



Aide à la conception de chaînes logistiques humanitaires efficientes et résilientes : application au cas des crises récurrentes péruviennes

Jorge Vargas Florez

► To cite this version:

Jorge Vargas Florez. Aide à la conception de chaînes logistiques humanitaires efficientes et résilientes : application au cas des crises récurrentes péruviennes. Gestion et management. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2014. Français. NNT : 2014EMAC0008 . tel-01136171

HAL Id: tel-01136171

<https://theses.hal.science/tel-01136171>

Submitted on 26 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux conjointement avec l'INSA de Toulouse

Présentée et soutenue par :

Jorge VARGAS FLOREZ

le mercredi 15 octobre 2014

Titre :

Aide à la conception de chaînes logistiques humanitaires efficaces et résilientes : application au cas de crises récurrentes péruviennes

École doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Génie Industriel 4200046

Unité de recherche :

Centre Génie Industriel, École des Mines d'Albi-Carmaux

Directeur/trice(s) de Thèse :

Lionel DUPONT

Matthieu LAURAS

Jury :

Gilles PACHÉ, Professeur, Université Aix-Marseille, Président

Lyes BENYOUCEF, Professeur, Université Aix-Marseille, Rapporteur

Martina COMES, Associate Professor, University of Agder, Examineur

Lionel DUPONT, Professeur, École des Mines d'Albi-Carmaux, Directeur

Matthieu LAURAS, Maître assistant HDR, École des Mines d'Albi-Carmaux, Co-directeur

Aurélien CHARLES, Maître de conférence, Université Lyon 2, Examineur

REMERCIEMENTS

A Dieu, par la vie et ses bénéfices.

A ma mère, Eulalia Guadalupe Florez Uscamayta, « cholita », pour son exemple de vie, sa joie, sa patience, sa tolérance, son amour et sa discipline, qui m'ont aidé à continuer à chercher à être une personne meilleure et utile à la société.

A toute ma famille, mes amis, mes collègues et plus spécialement ceux du Centre de Génie Industriel, CGI, les enseignants et le personnel de l'Ecole des Mines d'Albi, de l'Université de Toulouse, de l'Ecole Doctorale Edsys et de la « Pontificia Universidad Católica del Perú », PUCP.

A Domingo Gonzalez (Chef du Département d'Ingénierie, PUCP) au Pérou et à Lionel Dupont (Directeur de Thèse), Matthieu Luras (Co-directeur de Thèse) et Aurélie Charles (Encadrant) en France. Merci de m'avoir soutenu et poussé à finir ce projet.

Merci à Gilles Pache et Lyes Benyoucef qui ont accepté de rapporter sur ce travail. Merci à Martina Comes qui a été membre du jury.



« Si tu veux faire quelque chose, fait le bien, sinon, il serait préférable de ne rien faire ».
Source : Eulalia Guadalupe Florez Uscamayta.

« Ne sois ni menteur, ni voleur, ni paresseux »
Source : l'enseignement moral de l'époque Inca.

TABLE DES MATIERES

PAGE

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. CONTEXTE DU TRAVAIL DE RECHERCHE.....	2
2. OBJECTIF DES TRAVAUX DE RECHERCHE.....	4
3. GRILLE DE LECTURE DU MANUSCRIT.....	6
CHAPITRE II. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DU TRAVAIL DE RECHERCHE.	7
1. OBJET DU TRAVAIL DE RECHERCHE.....	8
1.1. Les catastrophes.....	8
1.1.1. Catastrophes naturelles versus catastrophes humaines.....	8
1.1.1.1. Catastrophe naturelle.....	8
1.1.1.2. Catastrophe anthropique ou d'origine humaine.....	9
1.1.2. Catastrophes majeures versus catastrophes récurrentes.....	10
1.1.2.1. Le cas des éruptions volcaniques.....	11
1.1.2.2. Le cas des tremblements de terre.....	12
1.1.2.3. Le cas des inondations.....	12
1.2. Caractéristiques des catastrophes.....	13
1.2.1. Exposition au risque.....	13
1.2.2. Evènement déclencheur.....	14
1.2.3. Vulnérabilité.....	14
1.2.4. L'Indice mondial des risques.....	15
1.3. Gestion des catastrophes humanitaires et chaînes logistiques.....	16
1.3.1. Les acteurs.....	16
1.3.2. Le cycle de vie.....	17
1.3.3. Le processus.....	18
2. LES ENJEUX DU TRAVAIL DE RECHERCHE.....	21
2.1. La résilience au cœur du sujet.....	21
2.2. Les principales difficultés rencontrées par les CLH actuels.....	24
2.3. Le besoin de professionnalisation, de rationalisation et de performance.....	26
2.4. Un levier : le pré-positionnement des secours d'urgence.....	28
3. FORMULATION DE LA PROBLEMATIQUE RETENUE ET DEMARCHE SCIENTIFIQUE.....	31
3.1. Formulation de la problématique retenue.....	31
3.2. Méthodologie de recherche.....	32
CHAPITRE III. METHODOLOGIE POUR LA DEFINITION DE SCENARIOS HUMANITAIRES REALISTES ET REPRESENTATIFS	34
1. SYSTEME DE PREVISION DES CATASTROPHES ET DE LEURS CONSEQUENCES.....	35
1.1. Revue de littérature.....	35
1.1.1. Les prévisions dans le monde commercial.....	35
1.1.2. Les prévisions dans le monde humanitaire.....	40
1.2. Contribution n° 1 : modèle de prévision de la demande pour des catastrophes récurrentes.....	44

1.2.1. Principes généraux	44
1.2.1.1. Etape 1 : Identification des facteurs d'influence.....	45
1.2.1.2. Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.....	49
1.2.1.3. Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.....	52
1.2.1.4. Etape 4 : Validation du modèle de prévision.	53
1.2.2. Application numérique.....	54
2. METHODE DE CONCEPTION DE SCENARIOS HUMANITAIRES REALISTES.....	58
2.1. Revue de littérature.....	58
2.1.1. Incertitude et scénario.	58
2.1.2. Méthodes de définition de scénarios	60
2.1.2.1. Méthodes analytiques.....	60
2.1.2.2. Méthodes discursives.	61
2.1.2.3. Méthodes formelles.....	62
2.1.3. Définition de scénarios dans le monde humanitaire.....	62
2.1.4. Bilan.	62
2.2. Contribution n°2 : méthode d'élaboration de scénarios réalistes.	63
2.2.1. Principes généraux.	63
2.2.1.1. Etape n°1 : Analyser les événements passés.....	63
2.2.1.2. Etape n°2 : Définir le zonage	64
2.2.1.3. Etape n°3 : Déterminer les probabilités d'occurrence	65
2.2.1.4. Etape n°4 : Evaluer l'impact sur les populations.....	66
CHAPITRE IV. MODELE D'AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION DE CHAINES LOGISTIQUES ROBUSTES.....	68
1. CONCEPTION DES CHAINES LOGISTIQUES TRADITIONNELLES.....	69
1.1. Problématique et enjeux.....	69
1.2. Le facteur « risque » au centre du débat	70
1.3. Les approches de modélisation : déterministes, stochastiques ou robustes	73
2. LES PROBLEMES DE LOCALISATION.....	75
2.1. Présentation	75
2.2. Etat de l'art des problèmes de localisation.....	76
3. CONCEPTION DES CHAINES LOGISTIQUES HUMANITAIRES (CLH).....	79
3.1. Les spécificités du monde humanitaire à prendre en compte.....	79
3.2. Etat de l'art de la conception de CLH.	80
4. LOCALISATION D'ENTREPOTS DE PREMIER SECOURS	82
4.1. Présentation du cas d'application numérique	82
4.2. Contribution n°3 : Modèle de base de conception d'une CLH robuste pour un scénario donné.	88
4.2.1. Modèle mathématique.	88
4.2.2. Application numérique.....	89
4.2.3. Extension du modèle.....	90
4.2.4. Application multi scénarios.	91
4.3. Contribution n° 4 : Programme Stochastique Multi-Scénarios (PSMS) pour la conception d'une CLH robuste.....	93
4.3.1. Modèle mathématique.	93

4.3.2. Application numérique.....	95
4.3.3. Extension du modèle.....	95
4.3.4. Modèle multi-scénarios.	97
CHAPITRE V. APPLICATION AU CAS DE LA GESTION DES CATASTROPHES	
RECURRENTE AU PEROU.	99
1. LE PEROU.....	100
1.1. Présentation générale.....	100
1.2. Le Pérou et les tremblements de terre.	102
1.3. Le Pérou et « El Niño ».....	107
1.4. Mise en place de l'aide.....	108
2. MODELE DE PREVISION DE LA DEMANDE.	111
2.1. Etape 1 : Identification des facteurs d'influence.	111
2.1.1. Indice de Développement Humain (IDH).....	111
2.1.2. Taux d'Habitations Précaires.....	112
2.2. Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.....	114
2.3. Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.	116
2.3.1. L'analyse de la régression linéaire multiple, approche statistique.....	119
2.4. Etape 4 : Validation et exploitation du modèle	120
3. CONSTRUCTION DES SCENARIOS	126
3.1. Choix des scénarios	126
3.2. Evaluation de l'impact sur les infrastructures.....	130
3.2.1. L'impact sur la capacité d'entreposage.....	130
3.2.2. L'impact sur la capacité de transport.....	131
3.3. Les stocks.....	133
4. EXPLOITATION DU MODELE ET RESULTATS	134
4.1. Capacité totale stockée de 100 000.....	134
4.2. Variation des capacités globales stockées.....	137
CHAPITRE VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	140
1. BILAN DES APPORTS ACADEMIQUES ET APPLICATIFS.....	141
2. SUITES A DONNER ET PERSPECTIVES	143
RÉFÉRENCES	146
PUBLICATIONS	164
RESUME	167

Sommaire des Figures

	PAGE
Figure II-1 : Nombre de catastrophes naturelles dans le monde de 1950 à 2012.....	12
Figure II-2 : Niveau d'exposition des différents pays aux catastrophes naturelles.....	14
Figure II-3 : Indice mondial des risques 2013.....	16
Figure II-4 : Cycle de vie de la gestion d'une situation de crise.....	18
Figure II-5 : Structure de la Chaîne Humanitaire.	19
Figure II-6 : Les dépenses post-catastrophe varie en fonction des dépenses pré-catastrophe.	28
Figure II-7 : Démarche de recherche inductive.....	32
Figure III-1 : La prévision dans le processus de planification des chaînes logistiques.	37
Figure III-2 : De la donnée à la prévision.....	38
Figure III-3 : Le processus de prévision.	38
Figure III-4 : Méthodologie de la prévision en cas de crises.	45
Figure III-5 : Liaisons possibles entre individus.....	50
Figure III-6 : Exemple de projection des individus sur un plan.	51
Figure III-7 : Carte d'Analyse en Composantes Principales sur le cas exemple.	55
Figure III-8 : Méthodologie pour définir des scénarios réalistes.....	63
Figure III-9 : Exemple de propagation d'une éruption volcanique.	65
Figure III-10 : Exemple d'arbre de propagation.....	67
Figure IV-1 : Matrice de correspondance entre une supply chain et ses produits.....	70
Figure IV-2 : Carte de la zone étudiée avec les montagnes et les plaques tectonique.....	83
Figure V-1 : Les zones à risque du Pérou (Ministère Economie Pérou, 2003).....	102
Figure V-2 : Les séismes de subduction historiques depuis 1900 au Pérou.	102
Figure V-3 : Nature cyclique des grands tremblements de terre au Pérou et prévision.....	104
Figure V-4 : Distribution de fréquence des tremblements de terre.	104
Figure V-5 : Carte de la distribution d'intensité sismique maximale.....	106
Figure V-6 : Cartes sur les séismes au Pérou.....	107
Figure V-7 : Résultat de l'ACP réalisée.	114
Figure V-8 : Résultat de l'ACP intermédiaire sur les 4 facteurs discriminants.....	115
Figure V-9 : Résultat de l'ACP finale réalisée sur les valeurs des 3 facteurs discriminants.....	116
Figure V-10 : Arbre de propagation de l'impact.....	131
Evolution du nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts..	136
Figure V-11 : Evolution des coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.	137
Figure V-12 : Evolution du nombre total de victimes non secourues.	138
Figure V-13 : Evolution du nombre de victimes non secourues versus capacités global.....	139

Sommaire des Tableaux

	Page
Table II-1 : Catastrophes par victimes mortelles de 1900 à 2014.	9
Table II-2 : Bilan de l'ouragan Mitch en 1998.	15
Table III-1 : Les facteurs de caractérisation de la vulnérabilité - Partie 1.....	46
Table III-2 : Les facteurs de caractérisation de la vulnérabilité - Partie 2.....	47
Table III-3 : Les facteurs de caractérisation de la résilience.	48
Table III-4 : Facteurs caractérisant l'état de vulnérabilité et de résilience.	54
Table III-5 : Données pour le cas exemple. Cas d'Ancash au Pérou.	54
Table III-6 : Corrélations entre les facteurs de la vulnérabilité et résilience.....	55
Table III-7 : Données et résultats obtenus sur le cas exemple Ancash.....	56
Table IV-1 : Cas exemple - Scénarios (- = Faible : M = Moyenne : F = Forte).....	83
Table IV-2 : Cas exemple - Nombre de personnes à secourir.....	84
Table IV-3 : Cas exemple – Demandes associées à chaque scénario (en nombre de kits).....	84
Table IV-4 : Cas exemple – Flux inter-régions nominaux (en nombre de kits).....	85
Table IV-5 : Cas exemple – Capacité du réseau (% de la capacité nominale).....	85
Table IV-6 : Cas exemple - Capacité des entrepôts après la catastrophe.....	86
Table IV-7 : Cas exemple – Capacités et coûts d'entreposage par région.	87
Table IV-8 : Cas exemple – Coûts de transport entre les régions.....	87
Table IV-9 : Application numérique PMS – Demande par région.	89
Table IV-10 : Application numérique PMS – Impact sur les stocks régionaux.	89
Table IV-11 : Application numérique PMS – Flux maximums inter-régions.	90
Table IV-12 : Application numérique PMS – Synthèse des résultats.	90
Table IV-13 : Application numérique PMS étendue – Synthèse des résultats.	91
Table IV-14 : Application numérique – Identification des scénarios critiques.	92
Table IV-15 : Application numérique – Entrepôts ouverts et capacités stockés.....	92
Table IV-16 : Application numérique – Coûts finaux.	93
Table IV-17 : Application numérique PSMS – Résultats.	95
Table IV-18 : Application numérique PSMS – Pourcentage de non satisfaction.	95
Table IV-19 : Application numérique PSMS étendue – Synthèse des résultats.	96
Table IV-20 : Application numérique PSMS étendue – Non satisfaction.	97
Table IV-21 : Application numérique PSMS multi-scénarios.....	98
Table IV-22 : Application numérique PSMS multi-scénarios – Synthèse des résultats.	98
Table V-1 : Pérou, pays vulnérables aux effets négatifs du changement climatique.	101
Table V-2 : Tremblements de terre les plus importants du Pérou 1582-2007.	103
Table V-3 : Extrait de tremblements de terre historiques dossiers dès 1970 à 2007.....	105
Table V-4 : Kit des secours selon le bénéficiaire.....	108
Table V-5 : Alimentation recommandé en cas de crises.....	109
Table V-6 : Besoins élémentaires d'eau pour doit assurer la survie.	110
Table V-7 : Nombre maximum de personnes par source d'eau.....	110
Table V-8 : Données sur la vulnérabilité et la résilience pour les 24 régions du Pérou.....	113
Table V-9 : Corrélations entre les facteurs discriminants de la vulnérabilité et résilience.....	115
Table V-10 : Corrélations entre les 3 facteurs discriminants.	116
Table V-11 : Données des 3 facteurs discriminants pour le Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007....	117

Table V-12 : Nombre de victimes pour une catastrophe au Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007...	118
Table V-13 : Equation de régression pour chacun des 24 régions du Pérou.	119
Table V-14 : Résultats du Test de signification global.....	120
Table V-15 : Résultat de la régression multi-variée sur la région de Huánuco, année 2012.....	121
Table V-16 : Données pour le calcul de prévision de l'année 2012.....	121
Table V-17 : Evaluation de la qualité des modèles de prévisions obtenus (année 2012).....	122
Table V-18 : Calcul des moyennes de Victimes de 2003 à 2012.	124
Table V-19 : Estimations de demande récurrente sur les 24 régions : données corrigées.....	124
Table V-20 : Modèles retenus et prévisions associées pour 2012 sur l'ensemble des 24 régions.	125
Table V-21 : Probabilité d'occurrence et de magnitude des séismes au Pérou.	127
Table V-22 : Part de la population affectée selon la magnitude.	128
Table V-23 : Scénarios pour les régions Lima et Ica.....	128
Table V-24 : Les scénarios obtenus y la probabilité d'ocurrence.....	129
Table V-25 : Nombre de victimes structurellement impossible à secourir.....	130
Table V-26 : Résumé du zonage par sensibilité sismique (cas région Lima).	130
Table V-27 : Vue d'ensemble de réduction potentielle des capacités en fonction de l'intensité...	132
Table V-28 : Coûts de transport entre quelques régions du Pérou.....	133
Table V-29 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 1).....	134
Table V-30 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 2).....	135
Table V-31 : Nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts..	136
Table V-32 : Coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.	137

Chapitre I.

INTRODUCTION GENERALE.

En moyenne, chaque année, plus de 200 millions de personnes sont affectées par des catastrophes naturelles. Les organisations humanitaires doivent donc souvent mettre en place des chaînes logistiques complexes et ce dans un environnement excessivement volatile. Ces chaînes logistiques ont de nombreuses particularités qui les différencient de leurs homologues habituellement rencontrées dans l'industrie traditionnelle.

Après avoir été longuement débattu, le concept de chaîne logistique (*Supply Chain*) est aujourd'hui couramment perçu comme un réseau d'organisations – qui supporte des flux physiques, informationnels et financiers – impliquées par des relations en amont et en aval, dans différents processus et activités, qui fournissent un produit ou un service, dans le but de satisfaire le client (Christopher, 1992). Cette définition relativement consensuelle souligne la complexité des réseaux ainsi constitués. Mentzer et al. (2001) précisent qu'il est primordial de faire la distinction entre les chaînes logistiques et la gestion de ces chaînes (*Supply Chain Management*). La gestion suppose une action volontaire de l'ensemble des acteurs concernés par la création de valeur, alors que les chaînes logistiques constituent simplement un environnement existant dans lequel les processus s'exécutent. Beaucoup d'efforts ont ainsi été consentis ces vingt-cinq dernières années par les professionnels de la logistique pour mettre en place un pilotage global et coordonné de leurs réseaux afin d'assurer un meilleur service aux clients et de limiter les coûts. Dans le même temps, l'étude des chaînes logistiques par la communauté scientifique internationale a littéralement explosé comme le montre (Lamothe, 2010). Un des sujets majeurs de ces dernières années qui intéressent tout autant les scientifiques que les praticiens est sans aucun doute la capacité des organisations, notamment logistiques, à faire face aux aléas. Ces aléas peuvent être de simples hoquets dans le fonctionnement nominal d'une organisation ou d'un réseau d'organisations, ou bien il peut s'agir de véritables perturbations susceptibles de déboucher de véritables catastrophes ou situations de crise...

1. Contexte du travail de recherche.

La notion de catastrophe ou de crise¹ recouvre de nombreuses acceptions parmi lesquelles (Lauras, 2013) :

- *Acception étymologique* : le mot signifie originellement « décision », « jugement », puis par extension la phase décisive d'une maladie. Hors du domaine médical, le terme « crise » en est venu à désigner l'idée de trouble, les situations de déséquilibre profond, voire de désordre (économique, politique, géopolitique, climatique, etc.) ;
- *Acception orientale* : l'idéogramme chinois signifiant crise est la résultante de l'association de deux idéogrammes *Wei* danger et *Ji* opportunité ;
- *Acception générale* : plus précisément une crise est définie par le *Webster's New Collegiate Dictionary* comme un moment crucial et instable duquel résultera une évolution du système vers un état meilleur ou pire ;
- *Acception « industrielle »* : elle définit la notion de crise comme un état instable d'une organisation pouvant engendrer des résultats indésirables (Devlin, 2006) ;
- *Acception « humanitaire »* : une crise est une calamité qui provoque des victimes et potentiellement des dégâts matériels de grande ampleur (Ryfman, 1999).

Truptil (2011) et Rongier (2012) proposent des états de l'art complets de la notion de crise. Ils concluent au fait qu'une crise peut être définie comme un phénomène grave, créée par un événement déclencheur, qui plonge le système de départ dans une situation instable, d'urgence et d'incertitude.

Le monde humanitaire est par essence, un secteur très fortement lié à cette notion de crise. Qu'il s'agisse de situations d'urgence (tsunami, tremblement de terre par exemple) ou de crises longs termes (crises en Syrie ou au Soudan par exemple), les catastrophes humanitaires sont omniprésentes. Les professionnels de ce secteur travaillent sans relâche à concevoir et déployer des solutions qui permettent de résoudre (a minima de limiter) les conséquences de ces catastrophes qu'elles qu'en soient leurs origines.

Pourtant, force est de constater que les enjeux du monde humanitaire évoluent et que les outils dont il dispose ne sont plus suffisants. Au cours des vingt dernières années, le secteur humanitaire a beaucoup évolué. D'une part, la nature, la fréquence et l'importance des crises naturelles poussent les organisations humanitaires à gérer de plus en plus d'opérations en parallèle. D'autre part, les contraintes dues aux flux financiers restreints et aux exigences accrues des donateurs les poussent à davantage de professionnalisation et de rationalisation. Tous ces

¹ En anglais, deux mots sont généralement utilisés pour qualifier une crise : *crisis* et *disaster*. La différence de sens, selon les anglophones, est la suivante : « généralement, une crise est considérée comme due à l'homme et un désastre comme un phénomène naturel » (Mukhopadhyay, 2005). En français, le mot *crise* est le plus souvent utilisé dans la littérature quel que soit le type de crise, le mot *désastre* est très peu employé. Le terme *catastrophe* est utilisé mais pas toujours avec la même signification. Cela peut créer une certaine confusion. Des auteurs considèrent que la crise peut être le résultat d'une catastrophe c'est-à-dire que ces deux mots ne sont pas synonymes et d'autres utilisent les deux comme des synonymes. Dans ce document, pour simplifier la lecture, nous utiliserons indifféremment les mots *crise* et *catastrophe* pour tout type de crise.

éléments obligent le monde humanitaire et particulièrement les organisations logistiques associées, à changer... C'est dans ce contexte de recherche de performance, de mesure et d'amélioration que se positionnent nos travaux.

2. Objectif des travaux de recherche.

Notre intérêt s'est donc porté sur l'étude des Chaînes Logistiques Humanitaires (CLH). L'idée directrice qui a porté ce projet réside dans le constat suivant : le seul fait de disposer d'une CLH rapide et efficace (i.e. qui apporte le produit et/ou le service souhaité rapidement selon les engagements pris) n'est plus suffisant. Les CLH doivent aujourd'hui développer de nouvelles capacités leur permettant de mieux faire face à l'incertitude ambiante (particulièrement marquée en situation de catastrophe humanitaire) mais également de minimiser l'énergie dépensée (et donc les coûts) pour traiter la situation. Ces deux enjeux appellent à s'intéresser à deux notions fondamentales que nous reprendrons plus avant dans la suite de ce document : la *résilience* et l'*efficience*.

L'objectif poursuivi dans le cadre de cette thèse était donc de développer des solutions permettant d'accompagner les praticiens dans la conception de leurs CLH afin que ces dernières garantissent des niveaux de performance satisfaisants vis-à-vis de ces nouveaux enjeux. Cet objectif nous fait rentrer de plain-pied dans le monde de l'aide à la décision.

Deux types de problèmes de prise de décision sont classiquement identifiés dans la littérature (Jarrosion, 1994) : ceux dont les solutions sont contenues dans les données et ceux où elles ne le sont pas. Les premiers sont traités par des techniques ou méthodes formelles qui permettent de les résoudre de façon « optimale » alors que les seconds sont très fortement dépendants de celui qui décide, de sa sensibilité ou de sa créativité. Ainsi, (Jarrosion, 1994) distingue la *gestion* qui consiste à résoudre les premiers problèmes (calculatoires) du *management* qui est relatif au traitement de problèmes du second type. Dans le cadre de nos travaux, nous avons clairement adressé un problème de gestion.

Classiquement, on peut regrouper les théories de la décision en trois grandes familles (Kast, 2002) repris dans (Lauras, 2013) :

- Les théories du *comportement rationnel* : comportement d'un décideur rationnel dans une logique d'évaluation a priori des conséquences potentielles de sa décision. Ces théories ont pour objectif de tenter de formaliser comment décider que telle configuration ou décision est meilleure qu'une autre. Le principe consiste à trouver l'optimum de certains paramètres qui permettent de quantifier la qualité stratégique d'une situation ;
- Les théories du *comportement organisationnel* : comportement d'un décideur qui s'engage dans un processus progressif volontaire et itératif de recherche / conception / sélection de sa décision. Mais comme le décideur n'a qu'une rationalité limitée, au sens de Simon (1955 ; 1983), son comportement sera « satisfaisant » et non pas « optimisant ». Ce n'est pas le résultat qui est rationnel, mais c'est la procédure suivie ;
- Les théories *critiques* : relation information-décision instable, ambiguë, mais sensée qui s'inscrit dans le cadre d'un jeu social (March, 1981). L'information est recherchée dans un but très stratégique (pouvoir se justifier a posteriori des décisions déjà prises, saisir des opportunités, etc.) ou au contraire pour comprendre les comportements des autres (pouvoir suivre une règle commune, pouvoir faire confiance, etc.).

Arrêtons-nous un instant sur les théories critiques, et sur l'intérêt qu'elles peuvent avoir vis-à-vis du contexte que nous avons décrit précédemment. La notion de jeu social qu'elles véhiculent est tout à fait porteuse de sens dans le cadre d'une situation de crise. En effet, il n'est pas rare que les décideurs aient à justifier a posteriori des décisions, souvent subjectives, qu'ils ont eu à prendre dans le feu de l'action. Il n'est pas rare non plus que le comportement de tel ou tel acteur soit influencé par le comportement constaté de tel ou tel autre acteur.

Considérant ces éléments, nous émettons l'hypothèse que les gestionnaires de crise maîtrisent, bon gré mal gré, ces modes de prise de décision. Notre suggestion consiste alors à exploiter davantage des outils capables de clarifier les tenants et aboutissants de la décision qui devra être prise. C'est pourquoi nos travaux de recherche ont privilégié le développement de propositions relatives aux deux premières familles de théorie de la décision et ont cherché à développer des modèles formels d'aide à la décision.

Concrètement le projet de recherche que nous avons mené s'est intéressé à l'élaboration et à la mise en œuvre de méthodes et outils capables d'aider les praticiens humanitaires dans la définition et la structuration de leurs réseaux logistiques. Pour ce faire nous avons développé plusieurs contributions que nous proposons de détailler dans les chapitres suivants.

3. Grille de lecture du manuscrit.

Le décor étant maintenant planté, il nous faut désormais préciser les notions clés exploitées dans le cadre de ces travaux, développer les problématiques terrain et scientifique, et présenter les orientations retenues (méthodologie, outils) pour atteindre les objectifs fixés (Chapitre II).

Nous traiterons en suivant de l'élaboration de scénarios humanitaires réalistes et représentatifs. Ce chapitre visera à présenter les techniques et méthodes mises en œuvre pour mieux prévoir la future demande à laquelle les humanitaires devront faire face. Il s'agira notamment de développer une méthode de prévision de demande dédiée au cas des crises récurrentes et de structurer une méthodologie permettant de constituer des scénarios représentatifs de la réalité des faits et capables d'intégrer différentes dimensions d'incertitude (Chapitre III).

Nous focaliserons ensuite notre discours sur les modèles proposés pour soutenir la conception de CLH robustes. L'objectif sera ici de proposer des solutions capables de garantir des niveaux de performance satisfaisant en matière de résilience et d'efficacité en dépit des perturbations rencontrées (Chapitre IV). La proposition faite dans cette partie est basée sur des outils de programmation linéaire stochastique.

Nous illustrerons, tout au long du document, chacune de nos propositions au travers de petits exemples numériques capables de souligner les mécanismes de fonctionnement proposés. Mais au-delà de ces exemples, nous développerons un cas d'application plus complet de l'ensemble de nos propositions (Chapitre V). Ce cas d'application s'intéressera aux catastrophes récurrentes (essentiellement dues aux tremblements de terre et inondations) subies par le Pérou.

Enfin, nous clôturerons le manuscrit par un bilan et surtout la mise en exergue d'un certain nombre de perspectives susceptibles d'exploiter les limites de nos propositions (Chapitre VI).

Chapitre II.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DU TRAVAIL DE RECHERCHE.

« Catastrophe », « crise », « désastre » sont malheureusement des mots que nous sommes tous amenés à côtoyer quasi-quotidiennement. Mais sait-on ce que ces termes signifient exactement ? Connaît-on les enjeux associés à la gestion de ces évènements ? Quelles sont les limites des approches employées actuellement et quelles sont les améliorations qui pourraient s'avérer utiles ? Autant de questions que nous nous proposons d'adresser dans ce chapitre afin de dresser le contexte de notre projet de recherche et de comprendre les tenants et aboutissants de notre étude.

La finalité de ce chapitre est de caractériser l'objet de nos travaux (les catastrophes et leur gestion), de présenter les problématiques associées (dimensions métier et scientifique) et enfin d'explicitier le cadre de réponse (approche de résolution) que nous avons utilisé.

1. Objet du travail de recherche.

1.1. Les catastrophes.

Dans un premier temps, intéressons-nous à la notion de « catastrophe » (*disaster* en anglais) afin de délimiter les grandes lignes du projet de recherche. Pour l'UNISDR (Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes des Nations Unies), une catastrophe est définie « comme une rupture grave du fonctionnement d'une communauté ou d'une société impliquant d'importants impacts et pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales que la communauté ou la société affectée ne peut surmonter avec ses seules ressources » (UNISDR, 2009). L'Institut National de la Défense Civile Péruvienne, « *Instituto Nacional de Defensa Civil* » (INDECI) en donne une définition relativement proche (INDECI, 2010). Les catastrophes peuvent être classées en fonction de leur origine (naturelle ou anthropique) ou de leur fréquence (majeure ou récurrente).

1.1.1. Catastrophes naturelles versus catastrophes humaines.

1.1.1.1. Catastrophe naturelle.

Les éléments naturels sont à l'origine de phénomènes géologiques, atmosphériques, marins... qui échappent au contrôle de l'homme : avalanches, feux de forêt, inondations, mouvements de terrain, cyclones, tempêtes, séismes, éruptions volcaniques, inondations, sécheresse, montée des eaux, raz de marées, invasions d'insectes nuisibles. Ces phénomènes deviennent des risques naturels quand ils viennent menacer avec plus ou moins d'intensité les activités humaines. Ils sont reconnus comme catastrophes lorsque des vies, des biens, des moyens d'existence ou l'environnement sont détruits. L'explosion survenue le 30 juin 1908 dans la Toungouska en Sibérie a détruit intégralement la forêt dans un rayon de plus de 20 km, abattant 60 millions d'arbres, fait des dégâts sur plus de 100 km et déclenché de nombreux incendies pendant plusieurs semaines. Malgré l'ampleur des dégâts, cette explosion n'est pas répertoriée comme catastrophe naturelle parce qu'elle a touché une région quasiment inhabitée. Une crise due à une catastrophe naturelle est donc la rencontre entre un phénomène d'origine naturel et des enjeux humains, économiques ou environnementaux. Le CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*), classe les catastrophes naturelles en cinq sous-groupe selon leur origine.

- a) Événements géophysiques dues à des mouvements de masses solides :
 - a.1. Tremblement de terre ;
 - a.2. Tsunami ;
 - a.3. Volcans ;
 - a.4. Glissement de terrain ;
 - a.5. Avalanche ;
 - a.6. Coulée de boue ;
 - a.7. Affaissement de terrain.
- b) Événements météorologiques causées par les processus atmosphériques qu'ils soient de très courtes vie ou de longue durée :
 - b.1. Tempêtes tropicales ;
 - b.2. Cyclone, ouragan ;
 - b.3. Tempêtes localisées diverses (sables, blizzard, tornade) ;

- c) Événements hydrologiques causées par des perturbations du cycle de l'eau ou provoquées par le vent :
 - c.1. Inondations ;
 - c.2. Coulée de boue ou de neige ;
 - c.3. Montée des eaux ;
 - c.4. Affaissement du à l'eau (subsidence).
- d) Événements climatiques causés par les variations climatiques intra-saisonnière ou multi-décennale :
 - d.1. Température extrêmes ;
 - d.2. Sécheresse ;
 - d.3. Feux.
- e) Catastrophe biologique causée par l'exposition d'organismes vivants à des germes et des substances toxiques :
 - e.1. Epidémies de tout genre (virales, bactériologiques, fongique) ;
 - e.2. Infections ;
 - e.3. Invasion d'insecte (criquet) ou autre (vers).

Le tableau ci-dessous donne le nombre de victimes mortelles dues aux divers types de catastrophes de 1900 à 2014 (source EM-DAT : *the OFDA/CRED International Disaster Database*) :

Type	Nombre de victimes	Pourcentage
Climatique	11 886 871	36,6 %
Biologique	9 576 247	29,5 %
Hydrologique	7 000 964	21,5 %
Géophysique	2 665 711	8,2 %
Météorologique	1 383 677	4,3 %
Total	32 513 470	100 %

Table II-1 : Catastrophes par victimes mortelles de 1900 à 2014.

En 2011, 302 désastres naturels ont touché la planète. Outre les tremblements de terre et tsunamis au Japon, qui représentent la plus grande part des pertes économiques essuyées (210 milliards de dollars), mais aussi ceux survenus en Turquie et en Nouvelle-Zélande, d'importantes inondations en Thaïlande et en Australie ont entraîné de lourds tributs tant humains que financiers, deux donnes sont à retenir : (i) 29 782 personnes ont péri dans une catastrophe naturelle en 2011, 260 millions d'êtres humains ont été affectés (ii) 286 milliards d'euros (366 milliards de dollars) de dégâts ont été causés par des catastrophes naturelles et techniques en 2011, un niveau record en 30 ans, qui dépasse d'ailleurs largement le précédent (243 milliards de dollars en 2005, année de l'ouragan Katrina).

1.1.1.2. Catastrophe anthropique ou d'origine humaine.

Les catastrophes naturelles ne sont malheureusement pas les seules qui frappent l'humanité. Pour Wisner et al. (2004), les catastrophes causées par les événements naturels, ne constituent pas la plus grande menace pour l'humanité. De nombreuses catastrophes sont d'origine purement

humaine qu'elles soient militaires, industrielles ou technologiques. L'*International Decade for Natural Disaster Reduction Program*, IDNDR en 1997, donne la liste suivante des catastrophes d'origine industrielle :

- a) Libération de substances chimiques dans l'atmosphère par l'explosion, le feu ;
- b) Libération de substances chimiques dans l'eau (eaux souterraines, rivières, etc.) par rupture de la citerne ou de canalisation, produits chimiques dissoutes dans l'eau (ou le feu) ;
- c) Les déversements d'hydrocarbures en milieu marin ;
- d) Accident de satellite (radionucléides) ;
- e) Les sources radioactives dans des processus métallurgiques ;
- f) D'autres sources de rejets de radionucléides dans l'environnement ;
- g) Contamination par les activités de gestion des déchets ;
- h) La contamination des sols ;
- i) Accidents de contamination des eaux souterraines (route, rail) ;
- j) Contamination des eaux souterraines par les déchets des décharges (contamination se déplaçant lentement) ;
- k) Les accidents d'aviation ;
- l) Les rejets et les contaminations à la suite des actions militaires (uranium appauvri par exemple), ou destruction des installations ;
- m) Les rejets comme conséquence de l'utilisation industrielle de matériel biologique (par exemple, virus, bactéries, champignons).

Une distinction stricte entre catastrophes d'origine naturelle et catastrophes d'origine humaine reste toutefois artificielle. Certains conflits d'origine humaine se déroulant actuellement ont pour origine première des événements naturels qui ont entraîné une dégradation de l'environnement (sécheresse au Darfour par exemple). Inversement des catastrophes dites naturelles sont dues en fait à l'intervention humaine (glissements de terrain et inondations dues aux déforestations).

1.1.2. Catastrophes majeures versus catastrophes récurrentes.

Les médias parlent essentiellement des catastrophes majeures impliquant de nombreuses victimes (tsunami dans l'océan indien en 2004, tremblement de terre d'Haïti en 2010, tsunami au Japon en 2011, typhon aux Philippines en 2013...). C'est l'arbre qui cache la forêt. Depuis l'année 2000, chaque année plus de 400 catastrophes naturelles sont enregistrées à travers le monde. Dans de nombreuses régions du monde, les catastrophes se produisent de manière récurrente : sécheresses répétées au Sahel, cyclones dans les Caraïbes, inondations en Asie du Sud-Est, tremblements de terre le long de la ceinture de feu du Pacifique. Le sentiment général est que le nombre de catastrophes naturelles de petite ou moyenne envergure est en augmentation à travers le monde et va continuer à augmenter en raison des changements climatiques.

Pour Ferris et al. (2013), le terme « catastrophe récurrente » est utilisé pour désigner la venue répétée d'un danger naturel unique dans une même région géographique. En 2008, Haïti a été frappé par quatre ouragans au cours de l'année. Le Pakistan a connu des inondations en 2010, 2011 et 2012. Dans certaines régions, les périodes de sécheresse se produisent régulièrement, avec des pauses plus ou moins longues entre elles. Dans ce cas, si elles reviennent à des intervalles

suffisamment courts, nous pouvons parler de catastrophe récurrente. Bien que les inondations soient souvent considérées comme des catastrophes soudaines, elles peuvent s'étaler dans le temps. Par exemple, Thomas (2011) rapporte qu'en Colombie en 2010, les précipitations ont provoqué des inondations continues dans tout le pays. Ceci peut être vu comme une seule catastrophe continue.

Il y a aussi de nombreux cas où plusieurs crises surviennent la même année (ou parfois dans la même semaine). Par exemple, dans une analyse des crises humanitaires faite par le Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires (IRIN, 2012), on relève que sept pays d'Asie ont connu deux risques naturels différents au cours de l'année : l'Afghanistan (sécheresse et inondation) ; le Bangladesh et le Vietnam (inondations et tempêtes) ; l'Inde, la Malaisie, le Pakistan et le Sri Lanka (inondation et tremblement de terre). En conséquence, de nombreuses organisations nationales travaillent sur la base de risques multiples.

Mais l'interaction entre les risques naturels est encore plus complexe. Certains risques naturels ont tendance à se produire groupés : les cyclones et ouragans provoquent souvent des inondations et des glissements de terrain, les tremblements de terre peuvent causer des tsunamis. De plus, il existe généralement des imbrications entre les risques naturels et l'action humaine qui transforme un risque naturel en catastrophe.

Il y a aussi ce qui pourrait être considéré comme un enchaînement en cascade de catastrophes. Par exemple, en 2011, un grand tremblement de terre dans l'Est du Japon a provoqué un tsunami, qui a lui endommagé la centrale nucléaire de Fukushima, qui à son tour constitue une menace pour la vie humaine. En bout de compte, 200 000 personnes ont été évacuées de la zone (Grammaticas, 2011). Un tremblement de terre peut conduire à l'effondrement d'un barrage, provoquant d'importantes inondations ou bien une vague de chaleur peut causer des incendies de forêt comme cela s'est produit en Russie en 2010.

1.1.2.1. Le cas des éruptions volcaniques.

L'éruption du mont Pinatubo aux Philippines en Juin 1991 illustre la complexité des interrelations entre catastrophes. Des tremblements de terre ont été enregistrés au cours du mois précédant l'éruption du volcan. Pour certains scientifiques, ces tremblements de terre pouvaient être un signe d'augmentation de l'activité volcanique ou peut-être un facteur contribuant à l'éruption du volcan. L'éruption a été la deuxième plus forte du siècle (dix fois plus forte que celle du mont Sainte-Hélène en 1980) et a eu des effets mondiaux, entraînant une augmentation des niveaux d'ozone à travers le monde et une diminution globale de la température de 0,5 degrés Celsius. Mais les effets du volcan ont été intensifiés par le fait que le typhon Yunya a frappé les Philippines le même jour que l'éruption, à seulement 45 miles de distance du volcan. Les pluies du typhon se sont mélangées avec les cendres de l'éruption volcanique pour créer des lahars (coulées boueuses d'origine volcanique) énormes qui ont tout détruit rapidement.

Longtemps après l'éruption, de fortes pluies ultérieures ont déclenché la formation de nouveaux lahars. En outre, les lahars, la cendre et la pollution créée par le volcan ont empêché les cultures et accru l'insécurité alimentaire sur le long terme.

1.1.2.2. Le cas des tremblements de terre.

L'ensemble du pourtour de l'océan Pacifique est caractérisé par une activité sismique intense. Dans cette ceinture de feu du Pacifique, les tremblements de terre sont récurrents sur le long terme. La nature de la dynamique des tremblements de terre est cyclique. Ceci est dû aux conditions géomorphologiques (l'état de la masse de la terre en mouvement exprimé par son élasticité, la pression, la vitesse, etc.) qui déclenchent des mouvements mineur ou majeur de l'écorce terrestre. Les différents modèles sur les mouvements tectoniques proposés par Davis (1899), Penck (1973) et Hack (1975), confirment que le paysage se déforme progressivement selon l'équilibre atteint entre la déformation de la croûte terrestre et l'érosion. Le caractère aléatoire du tremblement de terre est de savoir quand sera rompu l'équilibre du système géomorphologique.

Pour Habibeh et Husaini (2011), le modèle des plaques tectoniques nous dit que l'enveloppe extérieure de la Terre (la lithosphère) est divisée en une mosaïque de plaques océaniques et continentales. On admet à présent que ces plaques tectoniques sont portées par les mouvements du manteau asthénosphérique sous-jacent. A l'interaction de ces plaques se produisent des processus géologiques importants tels que la formation de chaînes de montagnes, des volcans et des tremblements de terre. La tectonique des plaques fournit un cadre général permettant de décrire et d'expliquer un très grand nombre d'observations géophysiques (dérive des continents, distribution géographique de la sismicité, des chaînes de volcans, etc.). Les scientifiques se sont demandés quel pouvait être le moteur de la tectonique des plaques. La réponse est fournie par la physique et plus précisément par la dynamique des fluides, par les phénomènes de convection thermique à l'échelle de millions d'années (celle des phénomènes géologiques). Les matériaux terrestres se comportent comme un fluide, les plaques en subduction sont la manifestation évidente des courants de convection descendants, permettant de recycler la croûte et la lithosphère océanique.

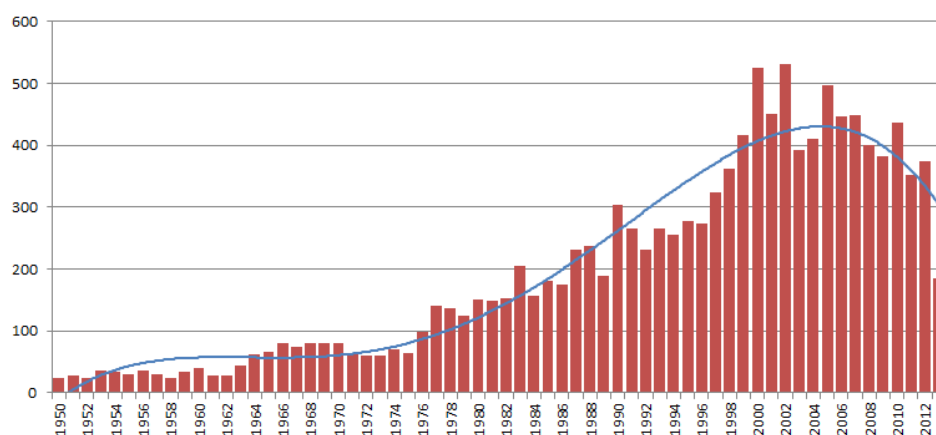


Figure II-1 : Nombre de catastrophes naturelles dans le monde de 1950 à 2012.

Source : http://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/catastrophes_naturelles.php

1.1.2.3. Le cas des inondations.

Les pêcheurs péruviens ont remarqué depuis des siècles que, certaines années, au moment de Noël, les eaux de surface sont plus chaudes que la normale. Une anomalie qui perturbe

considérablement leurs activités : le plancton ne proliférant que dans les eaux froides, les poissons ne peuvent plus se nourrir et les espèces marines se raréfient brutalement (<http://www.cnes.fr>).

Curieux phénomène, « *El Niño* » se produit de manière cyclique dans le Pacifique. Au large du Pérou, les eaux, habituellement entre 18 et 22 °C se réchauffent en quelques mois jusqu'à 29 °C. Cette anomalie naît avec l'affaiblissement des alizés qui, en temps normal, retiennent l'eau chaude à l'ouest du bassin, vers les Philippines. En 2 mois, ce réservoir chaud, couvrant une superficie égale à celle du continent nord-américain, se déplace vers l'est et atteint les côtes d'Amérique du sud (<http://www.cnes.fr>).

Ses conséquences ne se limitent pas à la pêche. Le climat de toute la planète s'en trouve affecté. Cet afflux de chaleur et d'humidité se répercute dans l'atmosphère, provoquant des précipitations conséquentes sur les pays riverains. Inondations au Pérou, tempêtes et tornades sur les îles du centre du Pacifique, des zones habituellement sèches comme l'Afrique de l'Est deviennent humides. A l'inverse, des régions pluvieuses comme l'Australie ou l'Indonésie connaissent la sécheresse et les incendies (<http://www.cnes.fr>).

Dans certains cas, « *El Niño* » est suivi d'un phénomène inverse, baptisé « *La Niña* » : les alizés soufflent à nouveau d'est en ouest, mais de manière exagérée par rapport au régime habituel. Les conséquences de « *La Niña* » sont opposées à celles de son frère, puisqu'elle apporte froid et sécheresse là où il apportait chaleur et humidité (<http://www.cnes.fr>).

Ces deux phénomènes se caractérisent par leur fréquence d'occurrence très élevée. En effet, tous les deux, trois ou quatre ans, pour une raison inconnue, ces phénomènes se reproduisent (en alternance) et durent entre 14 et 18 mois. (<http://www.notre-planete.info/>). Cause possible du réchauffement climatique, le phénomène El Niño en particulier est présent de manière quasi-annuelle depuis le début des années 1990.

Dans la suite, nous nous intéresserons plus spécifiquement aux catastrophes naturelles récurrentes, de petite ou moyenne envergure. Le cas des catastrophes récurrentes au Pérou, essentiellement basées sur des phénomènes de type tremblement de terre et inondations, servira de terrain d'application privilégié (voir Chapitre V).

1.2. Caractéristiques des catastrophes.

Tomasini et Van Wassenhove (2004) considèrent qu'une catastrophe est une situation à forts enjeux qui peut être considérée comme une évolution défavorable d'un phénomène néfaste se situant à l'intersection de trois forces :

- Une exposition ;
- Un événement déclencheur ;
- Une vulnérabilité.

1.2.1. Exposition au risque.

Comme on peut le vérifier sur la carte ci-dessous, les régions du monde ne sont pas égales face à l'arrivée des catastrophes naturelles. L'exposition est la probabilité qu'une catastrophe survienne dans un délai donné. Les géologues prévoient par exemple, avec une probabilité de 62 %, que des séismes majeurs (d'intensité 7,0 à 7,9 sur l'échelle de Richter) toucheront la région de la Turquie qui englobe Izmir, Istanbul et Ankara dans les 30 prochaines années. Les prévisions concernant l'exposition de Tokyo à un séisme sont à peu près analogues. L'exposition est clairement dépendante de la situation géographique.

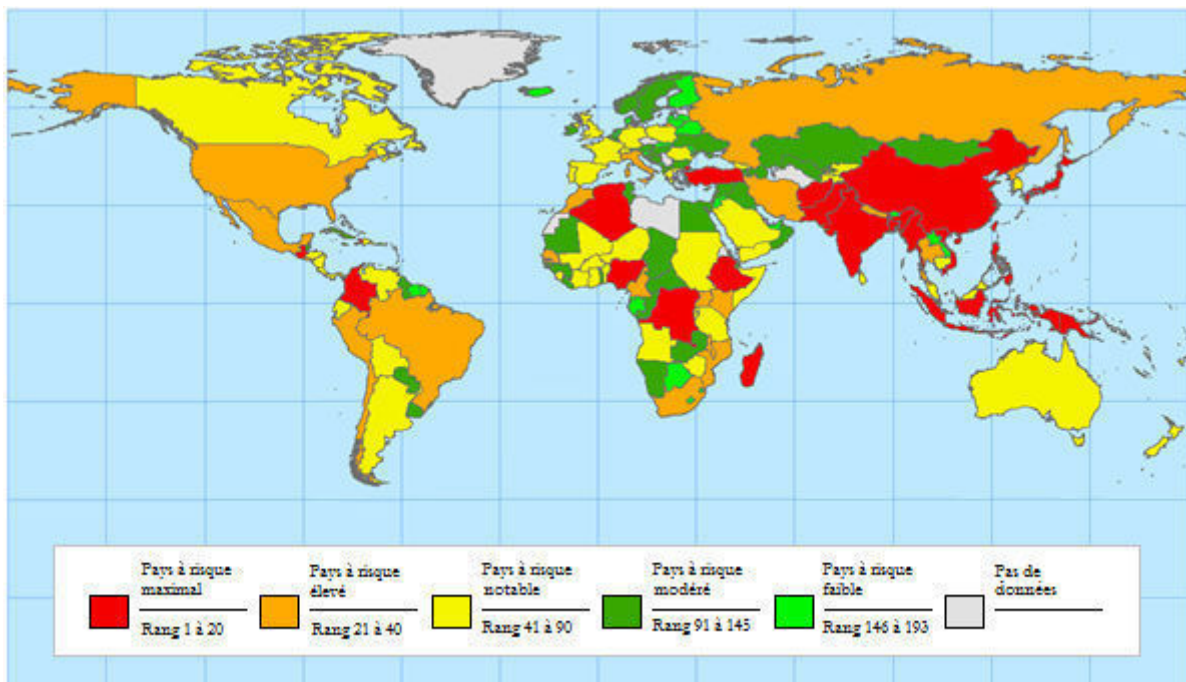


Figure II-2 : Niveau d'exposition des différents pays aux catastrophes naturelles.

Source : *Ubyrisk Consultants* – CATNAT.net, réalisé à partir de la base de données BD CATNAT.

1.2.2. Evènement déclencheur.

La notion d'évènement s'entend comme l'occurrence d'un phénomène naturel ou non qui concrétisera le risque d'exposition identifié précédemment. Dès lors, c'est bien cet évènement qui est susceptible de déclencher la survenue d'une catastrophe même s'il s'agit là d'une condition nécessaire mais non suffisante...

1.2.3. Vulnérabilité.

La vulnérabilité est la valeur attendue des dégâts dans l'éventualité où une catastrophe surviendrait. Deux régions peuvent être exposées de la même manière à un risque naturel, mais avoir une vulnérabilité différente aux dégâts qui découlent de la réalisation de ce risque. Un tremblement de terre de force 5,0 sur l'échelle de Richter ne fera pas le même nombre de victimes selon la région où il a son épicentre. La raison la plus immédiate est la densité de peuplement. Un séisme à Lima, ville de 8,6 millions d'habitants fera plus de victimes qu'un séisme de même nature à Cusco. Mais à population égale, d'autres critères rentreront en jeu. Certains sont purement naturels (la nature des sols) mais d'autres purement humain (le type de construction, le degré de préparation de la population).

De manière identique, un phénomène donné n'impactera pas de la même façon toutes les régions touchées. L'ouragan Mitch en octobre 1998 a frappé la plupart des pays d'Amérique centrale faisant plus de 19000 morts et de nombreux blessés. Une des constations frappante a été la grande hétérogénéité des conséquences sur les quatre pays au cœur de la zone d'impact.

Pays	Morts	Affectés	Population	PNB
El Salvador	475	84 000	6 031 000	\$ 2 850
Guatemala	384	105 700	10 713 000	\$ 4 070
Honduras	14 600	2 112 000	6 148 000	\$ 2 140
Nicaragua	3 332	868 228	4 763 000	\$ 1 790

Table II-2 : Bilan de l'ouragan Mitch en 1998.

Sources : EM-DAT (2004), WB (2000 : Tableau 1) pour le PNB par habitant, CELADE (2004 : Cuadro 1b) pour la population.

La vulnérabilité est liée aux caractéristiques naturelles (la nature des sols) mais aussi à des caractéristiques anthropomorphiques (région densément peuplée ou non, zone urbaine ou rurale, infrastructure existante). Entre autres, il est reconnu que la vulnérabilité est influencée par de nombreux facteurs socio-culturels tels que : le manque d'information, le système de représentation politique, les réseaux sociaux, la culture, le statut socio-économique (Cutter et al., 2003). Ainsi, les aléas potentiels, la géographie et les infrastructure interagissent avec le tissu social et économique pour influencer la vulnérabilité d'une région (Cutter et al., 2003). Ces études sont centrées sur l'idée que certains groupes sont plus à risque que d'autres. Carter (2006) observe que les sécheresses, les ouragans et autres catastrophes environnementales frappent surtout les populations pauvres et vulnérables dans de nombreuses parties du monde, ce qui les piège dans la pauvreté, le désespoir, et la dépendance.

La vulnérabilité est un instrument d'analyse a priori utilisée par les autorités publiques pour mettre en place des plans de prévention et par les assureurs pour fixer les conditions des contrats d'assurance. Elle se prête bien à l'analyse quantitative et statistique avec des indicateurs tels que :

- Nombre de personnes touchées par l'aléa s'il se produit ;
- Valeurs des biens détruits ;
- Pourcentage des personnes atteintes.

1.2.4. L'Indice mondial des risques.

L'université des Nations Unies pour l'environnement et la sécurité humaine (UNU-EHS) a défini un indice mondial de risque : le *World Risk Index* (WRI). Cet indice définit le risque comme l'interaction entre un risque naturel et la vulnérabilité humaine d'une communauté donnée : il s'agit donc d'un indice d'exposition humaine aux risques liés aux catastrophes naturelles. Le WRI doit aider les organisations humanitaires à mieux structurer leurs actions à plus ou moins long terme. Le WRI est calculé à partir des quatre indicateurs suivants :

- L'exposition à un risque naturel : séismes, tempêtes et cyclones, inondations, sécheresses et l'augmentation du niveau marin ;

- La prédisposition : la probabilité qu’une société ou qu’un écosystème donné soit endommagé en cas de catastrophe naturelle (conditions économiques et nutritionnelles, logement, infrastructures préexistantes) ;
- La capacité à faire face en fonction du type de gouvernance, du niveau de préparation, du degré d’anticipation des systèmes d’alerte, des services médicaux et du niveau de sécurité sociale et matérielle ;
- Les stratégies d’adaptation impliquant les capacités et les stratégies aidant les communautés à faire face aux conséquences négatives probables de catastrophes naturelles et du changement climatique.

Si les deux premiers points reprennent bien les concepts d’exposition et de vulnérabilité que nous venons de présenter, on remarque que le WRI tient compte également d’autres facteurs représentatifs de la capacité des états à (ré)agir en cas de survenue de la catastrophe. La section suivante s’intéresse justement à ces processus de réponse aux catastrophes.

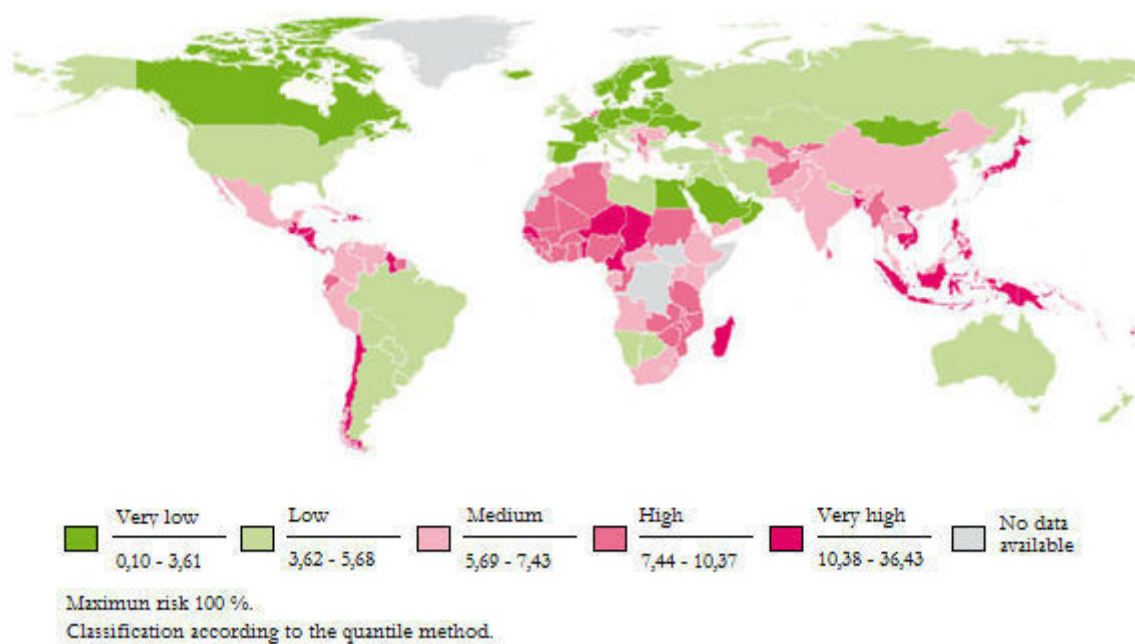


Figure II-3 : Indice mondial des risques 2013.

Source: United Nations University for Environment and Human Security, UNU-EHS et The Alliance Development Works/Bündnis Entwicklung Hilft, BEH.

1.3. Gestion des catastrophes humanitaires et chaînes logistiques

1.3.1. Les acteurs.

Dans sa définition, l’UNISDR met en exergue qu’une société frappée par une catastrophe ne peut la surmonter avec ses seules ressources. Les ressources nécessaires doivent donc être fournies par de l’aide extérieure à cette communauté. Pour une catastrophe de faible ampleur, elles sont fournies principalement par l’entraide nationale (organisations gouvernementales ou privées), avec la collaboration d’organisations internationales déjà présentes dans le pays. Les catastrophes plus conséquentes mobilisent l’aide internationale sous ses différentes formes. Cette aide peut provenir :

- Des pays étrangers (fonds publics, protection civile, sapeurs-pompiers, moyens militaires) : ainsi la France en 2004 a mobilisé 337 M€ de fonds publics dont 23 M€ en provenance des collectivités territoriales en faveur des victimes du tsunami et envoyé des dispositifs d'intervention médicale et chirurgicale de la sécurité civile. L'Union européenne dans son ensemble (la Commission et les États membres) est le premier bailleur humanitaire public au monde, puisqu'elle fournit la moitié de l'aide internationale publique ;
- Des institutions internationales : l'ONU a mis en place un système international de réponse aux catastrophes à travers divers dispositifs pilotés par l'OCHA (*Office for the Coordination of Humanitarian Affairs*). Cet office est chargé de rassembler les acteurs humanitaires pour assurer une réponse cohérente aux situations d'urgence. Il envoie en particulier des équipes UNDAC (*United Nations Disaster Assessment and Coordination*) pour évaluer la situation et assurer la coordination sur le terrain en cas de catastrophe. Ces équipes peuvent être mobilisées très rapidement (dans les premières 12 à 48 heures) partout dans le monde ;
- D'organismes non gouvernementaux : il existe une multitude d'ONG. Dans le cas de catastrophes, deux types d'ONG humanitaires interviennent : (i) Les ONGs caritatives tels que Médecins sans frontières, le Comité international de la Croix-Rouge (CICR), l'*International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies* (IFRC), plutôt spécialisées dans l'aide d'urgence. (ii) Les ONGs de développement tels que : Le Comité Catholique contre la Faim et pour le Développement (CCFD-Terre Solidaire) ou Action contre la Faim (ACF) qui travaillent sur des programmes à long terme.

Schématiquement, on distingue deux phases dans l'assistance :

- La phase de réaction ou phase de crise, immédiatement après la catastrophe : la demande porte sur la fourniture de services d'urgence et la satisfaction des besoins essentiels de subsistance des personnes touchées. On retrouve là les ONGs caritatives ;
- La phase de récupération (ou redressement) où l'objectif est de restaurer les conditions de vie et de redonner des moyens pérennes de subsistance (logement, services...). Au départ, on aura l'intervention des ONGs caritatives puis, en relais, les ONGs de développement.

1.3.2. Le cycle de vie.

Alexander (2002) a proposé un phasage de la gestion des situations de crise en quatre temps forts (voir figure suivante) :

- 1ère phase - prévention : cette phase est antérieure à la survenue d'une crise. Elle a pour objectifs de diminuer la probabilité d'apparition des risques liés à la crise et leurs conséquences s'ils surviennent. Si l'on prend le cas d'une catastrophe naturelle, il est possible, par exemple, de gérer les implantations dans les zones dangereuses ou encore d'améliorer la résistance des structures susceptibles d'être frappées par ce désastre ;
- 2ème phase - préparation : cette phase a lieu également avant une crise. Elle consiste à établir de nouveaux processus de réponse adaptés aux futures crises. Par exemple des exercices d'entraînements peuvent être réalisés, les secours planifiés ou des stocks positionnés à proximité des zones à risque ;
- 3ème phase - réponse immédiate : elle regroupe toutes les actions à réaliser au plus vite après l'événement déclencheur d'une crise comme par exemple le déclenchement d'un

plan d'opérations de secours ou l'évacuation des populations menacées. L'objectif principal à ce niveau est de mettre en place un ensemble d'actions qui agira sur le système en crise pour qu'il revienne au plus tôt dans un état maîtrisé. Altay et Green (2006) expliquent que la réponse consiste en l'utilisation de ressources et de procédures d'urgence pour préserver la vie, l'environnement et la structure sociale, politique et économique d'une communauté ;

- 4ème phase - rétablissement : cette étape a lieu une fois que la situation d'urgence a été prise en charge pour faire en sorte que le système perturbé retrouve son régime nominal. Les équipes d'intervention peuvent, par exemple, remettre en état des infrastructures ou prodiguer des soins aux populations déplacées.

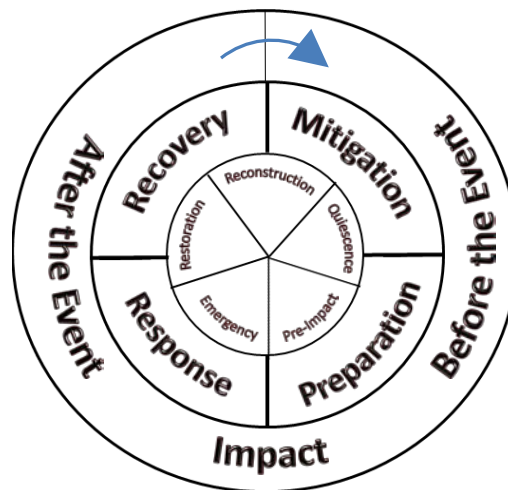


Figure II-4 : Cycle de vie de la gestion d'une situation de crise

Source : Alexander (2002)

La gestion des crises humanitaires suit ce schéma.

1.3.3. Le processus.

Les caractéristiques de fonctionnement des chaînes de secours diffèrent selon le type de catastrophe et les types d'acteurs concernés. Toutefois, si l'on se réfère aux travaux d'auteurs tels que (Beamon, 2004 : Van Wassenhove, 2006 : Stephenson, 2005 : Oloruntoba et Gray, 2009), il est possible de schématiser le fonctionnement d'une Chaîne Logistique Humanitaire (CLH) comme indiqué sur la figure suivante. La chaîne avant la survenue d'une catastrophe comprend les achats et la constitution des stocks de pré-positionnement tandis que les opérations post-catastrophes se concentrent principalement sur les achats et le transport (Balcik et al, 2009).

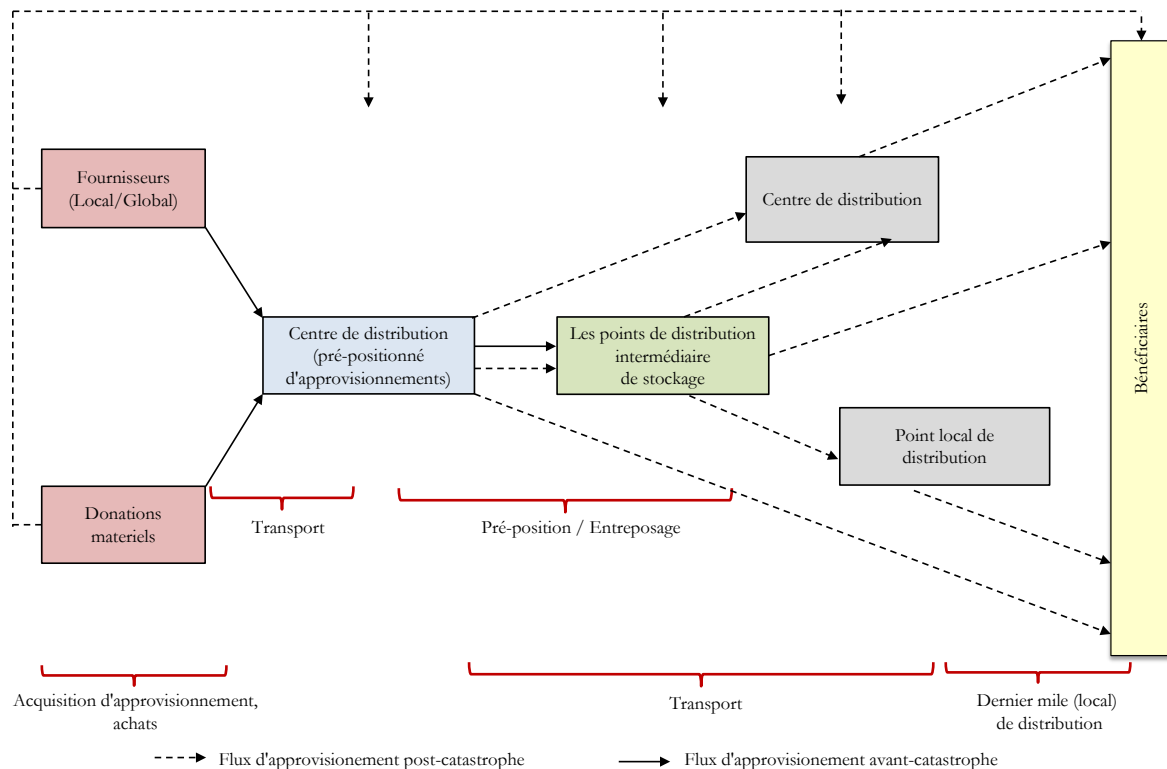


Figure II-5 : Structure de la Chaîne Humanitaire.

La gestion de crises humanitaires impose de gérer tout à la fois les matières, les hommes, l'information et les fonds financiers. Tomasini et Van Wassenhove (2009) synthétisent les entités d'une CLH sous le sigle 5B pour « *Boxes, Bytes, Bucks, Bodies et Brain* » :

- *Boxes* ou flux de matières qui représente le flux physique des produits des fournisseurs aux bénéficiaires, ainsi que le flux inverse pour les retours des produits, le service et le recyclage ;
- *Bytes* ou flux d'information qui représente la passation et le suivi des commandes qui coordonnent les flux physiques ;
- *Bucks* ou flux monétaires qui représente les conditions de crédit, les échéanciers de paiement et les accords d'expédition ;
- *Bodies* ou collaborateurs qui représentent tout le personnel déployé à chaque intervention pour mettre en œuvre la chaîne logistique ;
- *Brain* ou connaissances et compétences ; cela est particulièrement vrai dans le secteur humanitaire, puisque chaque fois qu'une CLH est déployée en réponse à une catastrophe les compétences nécessaires doivent être rapidement reconfigurées, parce que chaque CLH est nouveau et différent.

Au final, la logistique humanitaire peut être définie comme le processus de planification, de mise en œuvre, de contrôle de l'efficacité des flux économiques, de l'entreposage des marchandises et des matériaux, ainsi que le contrôle des informations connexes, du point d'approvisionnement au terrain de service pour le bénéficiaire, afin de répondre aux exigences des démunis. Les opérations humanitaires couvrent l'ensemble du cycle de vie d'une catastrophe, y compris la préparation, l'intervention et le rétablissement.

Lauras (2013) a démontré combien la performance des activités logistiques était déterminante pour la performance globale de la réponse à une catastrophe humanitaire. Mais se pose alors la question de savoir ce qui fait la performance d'une CLH et de quels sont les axes d'amélioration potentiels.

2. Les enjeux du travail de recherche

2.1. La résilience au cœur du sujet

Si la gestion des chaînes logistiques (*Supply Chain Management*) est depuis longtemps maintenant un sujet de recherche mature et reconnu, de nombreux axes de travail restent à explorer. Lamothe (2010) en propose une liste assez exhaustive. Parmi les pistes qu'il évoque, la question du comportement des chaînes logistiques face aux incertitudes apparaît comme un sujet central. L'incertitude est l'état de défaut d'information, même partiel, relatif à la connaissance d'un événement, de ses conséquences et/ou de sa vraisemblance (*International Organization for Standardization, ISO 31000 Guide 73 : 2009, définition 1.1*). Les chaînes logistiques actuelles n'ont jamais été aussi complexes et autant perturbées par des aléas (aléa sur la demande, aléa de production, aléa fournisseur, etc.). Pour autant, la plupart des modèles et approches proposés dans la littérature pour améliorer la performance des chaînes logistiques s'affranchissent de ce problème en émettant des hypothèses restrictives qui négligent ou considèrent de manière trop simplistes les incertitudes (Benyoucef, 2008). Ce constat est repris par de nombreux auteurs tels que (Beamon, 1998 : Goetschalckx *et al.*, 2002 : Meixell et Gargeya, 2005 : Benyoucef, 2008 : Lamothe, 2010 : Lauras, 2013). Pourtant (Marquès, 2010) rappelle à juste titre que le rôle du *Supply Chain Management* est bien de permettre la bonne exécution des processus indépendamment de ces perturbations.

Se pose dès lors deux questions aux différentes parties prenantes :

- Comment considérer et anticiper ces événements (perturbations, menaces, aléas, accidents, etc.) ? C'est ce que nous appellerons la *détection* ;
- Comment maintenir, en dépit de la survenue de ces événements, une bonne performance de leurs réseaux logistiques ? C'est ce que nous appellerons la *réaction*.

La littérature évoque de nombreux concepts susceptibles de répondre, au moins partiellement, à ces problématiques. Parmi celles-ci, c'est sans doute les notions de *stabilité*, de *flexibilité*, de *robustesse*, d'*agilité* et de *résilience* qui prédominent. Le lecteur pourra se référer aux travaux de (Christopher et Peck, 2004 : Sheffi, 2005 : Lamouri, 2006 : Tang, 2006 : Caux et al., 2007 : Zsidisin et Ritchie, 2008 : Hu et al., 2008 : Charles, 2010) pour se faire une idée précise de ce que chacun de ces termes supposent.

Dans notre approche, nous avons retenu les définitions suivantes :

- La *stabilité* se définit comme la remise en cause exceptionnelle des variables de décision (Lamouri, 2006). Il s'agit de limiter autant que faire se peut les modifications de décision, pour limiter la nervosité du système ;
- La *flexibilité* se définit comme l'aptitude du système à s'adapter et à réagir aux modifications de son environnement (Caux et al., 2007). Il s'agit de propriétés intrinsèques du système et non pas de capacités ;
- La *robustesse* se définit comme la dispersion d'un indicateur de performance du système face à des perturbations (Lamouri, 2006). Il s'agit ici d'adapter les décisions de façon à

maintenir un niveau de performance donné indépendamment des perturbations rencontrées ;

- L'*agilité* se définit comme la capacité de répondre rapidement et de façon adéquate aux changements à court terme concernant les demandes, l'approvisionnement ou l'environnement. Elle provient de la flexibilité, la capacité de réponse (détection, vitesse et réactivité) et l'efficacité des chaînes logistiques (Charles, 2010). L'*agilité* constitue pour les entreprises qui parviennent à l'atteindre un véritable atout vis-à-vis de leurs concurrents. *Agilité* est un mot-clé pour beaucoup de travaux de recherche de cette dernière décennie. Elle est aussi souvent définie comme étant l'habileté à répondre à des changements à court terme (Sheffi, 2004). Selon Lee, les objectifs des chaînes logistiques agiles sont de répondre rapidement aux changements à court terme en matière de demandes et approvisionnements et de gérer en douceur les perturbations extérieures (Lee, 2004). Pour Peck et Christopher, les principaux ingrédients de l'*agilité* sont la détectabilité et la vitesse. (Christopher et Peck, 2004) ;
- La *résilience* se définit comme la capacité d'un système à conserver son fonctionnement malgré une perturbation majeure et à récupérer son fonctionnement après une perturbation majeure (Tang, 2006 : Zsidisin et Ritchie, 2008). A l'origine ce terme utilisé en physique, caractérise la capacité d'un matériau soumis à un impact à retrouver son état initial. Il est passé ensuite dans le domaine de la psychanalyse avec en particulier les travaux du neuropsychiatre et psychanalyste Boris Cyrulnik. Pour un individu, la *résilience* est « tout à la fois la capacité de résister à un traumatisme et celle de se reconstruire après lui ». Cette acception s'est finalement étendue à de nombreuses autres communautés telles que la géographie, la gestion, l'économie... Le Livre blanc Défense et Sécurité Nationale France 2008 donne une dimension plus large à cette définition en indiquant que la *résilience* est « la volonté et la capacité d'un pays, de la société et des pouvoirs publics à résister aux conséquences d'une agression ou d'une catastrophe majeure, puis à rétablir rapidement leur capacité de fonctionner normalement, ou à tout le moins dans un mode socialement acceptable ». Au final, il s'agit ici d'être en mesure de résister aux perturbations fortes et de s'adapter de façon à retrouver rapidement un régime nominal. Elle concerne non seulement les pouvoirs publics, mais encore les acteurs économiques et la société civile tout entière.

A la lecture de ces définitions, il est clair qu'une organisation soumise à perturbations n'aura pas le même comportement selon qu'elle est plus ou moins *flexible* et qu'elle met en œuvre des capacités de *stabilité*, de *robustesse*, d'*agilité* et/ou de *résilience*. Si les enjeux de ces nouvelles capacités sont aujourd'hui clairement compris et partagés, la variété des approches proposées dans la littérature (Christopher et Peck, 2004 : Tang, 2006 : Caux et al., 2007) pour y parvenir montre combien le sujet est encore exploratoire. Néanmoins si on se réfère aux travaux de (Christopher et Peck, 2004 : Tang, 2006 : Caux et al., 2007), il est possible d'associer les approches de *stabilité* et de *robustesse* à la gestion des perturbations de faible ampleur alors que l'*agilité* et surtout la *résilience* concerneront davantage la gestion des perturbations majeures. La nature même de nos travaux fait que nous nous sommes principalement intéressés à la seconde famille de problèmes et donc aux moyens de parvenir à disposer de systèmes *résilients*.

Une fois la catastrophe arrivée se pose en effet la question du niveau de résistance du territoire concerné et le problème du retour à l'état de vie d'avant ou au moins à un état acceptable. Ce retour se fera plus ou moins rapidement et facilement selon les pays.

La résilience est complexe. Dans le temps, elle se décompose en trois phases :

- Avant la crise : mise en place d'actions pour réduire la vulnérabilité (constructions antisismiques), préparation à la crise par la formulation de scénarios et la formation, choix anticipé des orientations de reconstruction ;
- A l'arrivée de la crise : gestion de la crise de façon à maîtriser ses effets et sa durée ;
- Après la crise jusqu'au rétablissement des fonctions de la vie sociale et de la reconstruction.

La résilience (comme la vulnérabilité d'ailleurs) sont largement déterminées par des facteurs économiques et sociaux et donc par le niveau de développement du pays. Elles sont bien évidemment liées :

- A des facteurs structurels (géographie, revenu moyen, PIB...) ;
- A des facteurs politiques (mise en place ou non d'infrastructure d'aide, présence et application stricte de normes de construction) ;
- Aux institutions (démocratie, corruption, liberté de la presse) : pour Sen (1981) par exemple, au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, l'Inde a subi moins de famines que la Chine parce qu'elle disposait d'institutions démocratiques et d'une presse libre.

Pine (2009) considère que plus fort est le capital social, économique et environnemental d'une communauté, plus elle dispose de ressources pour se reconstruire. Un taux de chômage bas, un salaire moyen élevé reflète une économie forte. Si on y ajoute un taux de criminalité bas, un taux de décrochage scolaire faible ou un petit pourcentage de familles en dessous du seuil de pauvreté, on peut penser que la communauté est dans une meilleure position pour surmonter une catastrophe. Dresser l'inventaire des actifs et des ressources de la communauté étudiée, estimer ses atouts constitue généralement la première étape de la compréhension de sa résilience. Ceci va permettre de constater les forces et les faiblesses de cette communauté. Si elle possède des atouts sociaux, économiques et naturels forts et pérennes, elle sera susceptible de répondre et de récupérer rapidement après un sinistre. Nakagawa et Shaw (2004) notent qu'il existe des caractéristiques communes qui suggèrent que certaines communautés sont plus résilientes que d'autres. Ils voient un mélange complexe de facteurs sociaux, économiques, religieux et politiques présents qui influencent la résilience des communautés. Bruneau et al. (2000) proposent de modéliser les risques et de mesurer la résilience d'une communauté par le biais de mesures quantitatives combinées à de l'information qualitative caractérisant le risque. Leurs mesures s'articulent autour de quatre caractéristiques :

- La robustesse du système pour résister à la perte de la fonction ;
- La redondance des éléments du système qui subit une perte ;
- L'ingéniosité et la capacité à mobiliser des ressources lorsque le système est menacé ;
- La rapidité à atteindre les objectifs au moment opportun.

A ces facteurs s'ajoutent aussi des facteurs de comportement social. Prenons par exemple le comportement japonais après un tremblement de terre. On ne rapporte aucune présence significative de pillages ou d'émeutes dans les territoires touchés contrairement à ce qui se passent dans d'autres sociétés exposées à des événements similaires (BBC, 2011). Cela montre que, bien au-delà des données statistiques, ce sont les caractéristiques culturelles qui expliquent l'existence ou l'absence de pillages ou d'émeutes après une catastrophe. Quarantelli et Frailing (2007) présentent les deux points de vue suivants :

- Le pillage de toute nature est rare dans certains types de catastrophes et dans certains types de sociétés. Le motif des pillages suite aux catastrophes naturelles est différent de ce qui se passe dans le cas des troubles civils. Il existe des cas atypiques où le pillage n'a pas lieu lorsqu'un ensemble de conditions sociales complexes existent ;
- Le pillage après les catastrophes n'est pas un mythe. Il s'agit d'un phénomène bien documenté et le cacher n'est pas utile. Ceux qui planifient les interventions en cas de catastrophe ont besoin d'anticiper les comportements antisociaux pour y apporter des réponses efficaces. Ils doivent répondre aux besoins fondamentaux de la population et passer le plus rapidement possible dans la phase de récupération.

Pour O'Leary (2004), les chercheurs ont constaté, au moins immédiatement après la survenue d'une catastrophe, que la résilience va de pair avec l'unité de la communauté, le renforcement des liens sociaux, l'auto assistance, l'altruisme et le comportement pro-social. En bref, quand les choses sont au pire, les communautés sinistrées tendent à sortir collectivement de la situation.

Nombreux sont les auteurs à s'être intéressés à la manière de parvenir à atteindre cet objectif de résilience dans les Chaînes Logistiques Humanitaires (CLH). Christopher et Peck (2004) par exemple évoquent la nécessité de remettre en cause de façon permanente les processus et organisations en place. Ils soulignent combien les processus collaboratifs existants et la capacité d'adaptation des acteurs influencent le niveau de résilience de la chaîne. Sheffi (2005) parle lui de développer les propriétés du réseau en termes de flexibilité et de redondance. Tang (2006) recense de nombreuses approches visant à améliorer la résilience liée à la stratégie d'approvisionnement, à la stratégie produits, à la gestion de la demande et à la gestion de l'information. Bien que proposant des pistes différentes, tous ces auteurs se retrouvent sur un point : la résilience d'une organisation est intimement liée à sa capacité à gérer les risques et notamment à prévoir les moyens nécessaires et à anticiper la réponse à apporter en cas de survenue d'une crise. Ce qui peut notamment s'entendre comme la capacité à disposer d'un réseau logistique performant après la survenue d'une catastrophe.

2.2. Les principales difficultés rencontrées par les CLH actuels

Les CLH sont formées dans un laps de temps très court après une catastrophe. De nombreux facteurs représentent des contraintes pour la logistique, par exemple : les infrastructures logistiques préexistantes, la situation politique, le nombre même des intervenants humanitaires, les dommages causés par la catastrophe et parfois l'environnement sécuritaire.

Le gouvernement concerné et les ONGs impliquées dans la fourniture d'aide humanitaire, sont les principaux acteurs de ces CLH. Pour Ben-Tal et al. (2011), la logistique d'urgence est le

composant essentiel de la réponse humanitaire. Sans la mise en place rapide des secours et des canaux de distribution d'aide, les crises seraient certainement plus longues et dommageables pour les populations touchées. Pour Rodman (2004) les principaux obstacles à la réalisation de ce défi sont :

- L'incertitude : c'est le défi majeur dans la logistique humanitaire. Habituellement, on ne dispose pas d'indication sur la date et le lieu où la catastrophe frappera. On ne sait pas combien de personnes seront touchées, quelles infrastructures resteront opérationnelles. On ignore qui fera un don et les montants collectés, si les fournisseurs seront coopératifs ou si d'autres obstacles peuvent survenir ;
- La dégradation des infrastructures : ce fut le cas en Haïti après le tremblement de terre du 2010 où les infrastructures étaient devenues inopérantes : nombreux moyens de transport coupés, énergie électrique et communication en panne. L'aéroport international Toussaint Louverture est resté inaccessible, les routes et autoroutes étaient bloquées par des débris, quatre ponts ont été endommagés, le port de Port-au-Prince a été sérieusement affecté (quai Nord détruit et quai Sud gravement endommagé) (APNRDH, 2010) ;
- Les communications : le manque de communication au sens large est un obstacle majeur pour l'acheminement de l'aide. Outre l'infrastructure de communication endommagée, le simple obstacle de la langue pose des difficultés évidentes de communication ;
- Les ressources humaines : la formation faible ou inexistante des intervenants influe sur la qualité d'une opération logistique. Les responsables de terrain sont confrontés à une montée des exigences pendant les opérations de secours : demandes de la population affectée et du gouvernement local, pression des médias internationaux, surveillance de l'organisation, restrictions imposées par les bailleurs de fonds et demande de renseignements pour connaître la façon dont l'aide est administrée ;
- L'affectation des fonds : un autre problème majeur rencontré par les responsables de la logistique dans les organisations humanitaires est que le donneur a une influence notable sur le lieu et la manière dont l'aide est distribuée alors que les victimes sont une tierce partie avec peu de poids (Long et Wood, 1995) ;
- L'environnement : les denrées médicales telles que les produits pharmaceutiques, le sang et certains équipements demandent souvent des conditions rigoureuses de température et de d'humidité qui compliquent le tri et le stockage (OPS, 2000a) ;
- La culture : de nombreux pays ont des besoins alimentaires spécifiques. Certains pays interdisent les aliments contenant des OGM. Les populations islamiques ont l'interdiction religieuse d'utiliser le porc dans l'alimentation. L'OPS (2000b) préconise de faire un examen attentif de tous les aspects socio-environnementaux et culturels de sorte qu'aucune partie de la population touchée ne soit négligée ;
- La sécurité : Long et Wood (1995) indiquent qu'il y a aussi des défis posés par les dommages ou les vols occasionnés aux stocks. Ils notent que, parfois, la seule façon d'obtenir assez de nourriture pour la population touchée, est de livrer assez de matériel pour que les voleurs prennent leur pourcentage et laissent passer le reste ;
- La bureaucratie : les exigences de documentation complexes pour la douane et le dédouanement peuvent aussi être un problème (Long et Wood, 1995). L'aide doit parfois voyager dans plusieurs pays en utilisant plusieurs modes de transport. Chaque fois que les marchandises changent de mains, un inventaire doit également être effectué pour valider

les bordereaux. Le transport peut être facilité en améliorant la collaboration avec les gouvernements locaux et en rationalisant les permis d'importation et de circulation dans le pays (Stewart, 2003). Mais cela peut être impossible si le gouvernement du pays hôte n'exerce pas un contrôle suffisant sur les ports et aéroport ou si la coopération avec le gouvernement entre en conflit avec l'état de neutralité de l'organisation humanitaire ;

- Les autres obstacles dus aux manipulations : exigences d'emballage spéciaux, aménagement de la charge. Le conteneur de transport standard pour les produits céréaliers est un sac de 50 kg. Il s'agit de la plus grande quantité qu'une personne puisse transporter.

Chandes et Paché (2010) ont également étudié ces facteurs qui dégradent le fonctionnement d'un système de réponse humanitaire. Leur travail porte sur l'étude d'un cas particulier : le séisme de Pisco au Pérou en 2007 :

« Le séisme de Pisco (Pérou) le 15 Août de 2007, séisme de 7,9 sur l'échelle de Richter, a fait 500 morts et a touché directement plus de 655 000 personnes. Pour satisfaire leurs besoins en eau, nourriture, abris, vêtements etc. de suite, le Pérou a déclenché immédiatement des secours. L'aide humanitaire a été distribuée par plusieurs comités péruviens de Défense Civile de niveaux régional, provincial et municipal et compte tenu de l'amplitude de la catastrophe par l'Institute Nationale de Défense Civil (INDECI). Face à cette crise, l'INDECI n'a pas été en mesure de faire face aux événements et, en particulier, n'a pas pu répondre à la demande de l'aide sur le terrain. La gestion logistique a été plus que chaotique.

- *La réception et le transport des dons humanitaires ont été entièrement improvisés.*
- *L'aide humanitaire a été distribuée au hasard. Elle a été dupliquée de manière coûteuse dans certaines régions alors que les régions les plus isolées n'ont reçu qu'un soutien partiel. Pire encore, dans la confusion qui a suivi le tremblement de terre, on a pu noter des distributions de biens inappropriés aux besoins de la population ou encore impropres à la consommation (nourriture avarié, médicaments après leur date d'expiration, etc.). »*

Diverses pistes ont été envisagées pour améliorer les performances attendues de l'aide humanitaire (Chandes et Paché, 2010). Une partie de ces pistes tend à rapprocher les CLH des chaînes logistiques industrielles en leur apportant des outils et méthodes rationnelles (tableau de bord de la performance, utilisation d'indicateurs, recherche de facteurs clés de succès). Une autre partie tend à renforcer les facultés d'improvisations et d'adaptation des humanitaires (apprentissage auto organisationnel). La grande force de l'aide humanitaire réside en effet dans sa capacité à s'adapter au terrain et à réagir rapidement. Le challenge actuel consiste alors sans doute à lui fournir des outils de management et de planification proche de l'industrie, mais sans lui faire perdre ses capacités d'improvisation et de débrouillardise.

2.3. Le besoin de professionnalisation, de rationalisation et de performance

L'aide humanitaire mobilise des moyens financiers élevés. Une grande partie des fonds des ONGs proviennent d'un important réseau de donateurs (personnes physiques ou morales). L'aide humanitaire internationale est très sensible à l'importance de la crise et à sa médiatisation. Les exemples récents du tsunami au Japon, du tremblement de terre en Haïti ou du typhon aux Philippines sont dans toutes les mémoires. Ces événements exceptionnels qui ont fait des milliers de victimes ont drainé très rapidement des fonds très élevés. Dans le même temps, les conflits

armés, les maladies, les famines et les épidémies qui affectent des millions de personnes chaque année passent souvent inaperçus. Ces événements passent pour quasi-normaux dans de nombreuses régions du monde (en particulier dans les pays les moins développés). En 2012, l'IFRC (*The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*) relate que le monde a réagi par une vague de soutien lorsque l'ouragan Sandy a causé des dizaines de morts et déplacé des millions de personnes aux États-Unis. Cependant, l'impact dévastateur de cette catastrophe très visible sur les pays voisins (Bahamas, Cuba, la Jamaïque, Haïti et la République Dominicaine) est passé largement inaperçu par les médias. Et pourtant dans ces pays des Caraïbes de nombreuses personnes ont perdu leurs moyens de subsistance, leurs maisons ou leurs proches, et les communautés ont été dévastées. Au cours de ces dernières années, le secteur humanitaire a beaucoup évolué. Les acteurs se sont multipliés, allant de l'ONG locale aux grandes organisations internationales, en passant par des entreprises privées type DHL qui proposent leurs services en tant que prestataires logistiques.

D'une part, la nature, la fréquence et l'importance des crises naturelles poussent les organisations humanitaires à gérer de plus en plus d'opérations en parallèle et ce, à travers le monde. Sur le terrain, elles doivent faire face à des situations de plus en plus nombreuses et complexes, corrélées aux difficultés croissantes d'accès aux populations. Elles se trouvent confrontées à la conduite de programmes de plus en plus lourds et contraignants en moyens logistiques, financiers, humains, de pilotage ou de contrôle de gestion. D'autre part, elles rencontrent des contraintes dues aux flux financiers restreints et aux exigences accrues des donateurs. Les donateurs demandent des comptes et plus de transparence sur l'utilisation des sommes allouées. Ils veulent aussi des interventions moins improvisées dans l'urgence que par le passé.

Tout ceci pousse les organisations humanitaires à davantage de professionnalisation, de rationalisation et de performance, que ce soit dans la collecte des fonds ou dans leurs interventions sur le terrain :

- Professionnalisation de la gestion des crises : face à des enjeux de plus en plus cruciaux (vitaux, économiques, etc.), les organisations doivent renforcer leurs pratiques afin de parvenir à « améliorer », voire « optimiser » la gestion de ces crises. Il est en particulier indispensable de mieux tirer les enseignements des précédentes crises afin de capitaliser sur les résultats passés. Mais les organisations doivent aussi développer des moyens pratiques leur permettant de maîtriser les actions mises en œuvre pour résoudre une crise au-delà de la simple « expérience terrain » ;
- Rationalisation : l'aspect économique devient capital. Les donateurs (gouvernements, particuliers) réclament des preuves de la bonne gestion de leurs dons, ce qui nécessite un suivi rigoureux et surtout continu de la réponse à la crise afin de fournir des rapports et des justifications. Si la recherche du profit n'est en théorie pas un but, une présence réactive et médiatisée sur le théâtre des opérations est un prérequis pour mobiliser les fonds. Dès lors la réponse à une crise ne peut plus se cantonner à la mise en œuvre « à tout prix » d'actions plus ou moins efficaces. Il s'agit de savoir comment faire « aussi bien », voire « mieux », mais avec « moins » ;
- Performance : les crises sont de plus en plus médiatisées, les organisations mettent donc en jeu leur réputation à chaque intervention. Il faut donc que la réponse à une crise soit la

plus performante possible. Les acteurs de la réponse doivent notamment définir des objectifs et se donner les moyens de les atteindre.

2.4. Un levier : le pré-positionnement des secours d'urgence

Dans les médias, quand on parle d'interventions ou d'opérations humanitaires, on se situe clairement en phase d'urgence et de réponse immédiate après la survenue de la catastrophe. La réponse d'urgence sera plus efficace en termes de couverture des besoins et efficiente en termes de coûts si la chaîne logistique qui la sous-tend préexiste. Aussi la conception de la chaîne logistique doit être réalisée avant que les conditions de crises ne soient présentes. Plusieurs travaux confirment que la robustesse des systèmes humanitaires est basée sur la qualité de cette préparation (Chandra et Kumar, 2001). La figure suivante montre que les dépenses post-catastrophe varient en fonction des dépenses pré-catastrophe ; (A) Colombie : (B) Mexique : (C) Népal : (D) Indonésie.

Dans les opérations humanitaires d'urgence, la gestion de la demande est complexe par son caractère imprévisible, par la difficulté d'accès aux zones sinistrées et par la diversité des articles d'assistance à fournir (nourriture, médicaments, habitats d'urgence, générateurs, véhicules, équipements radio/ télécom...). Si on devait attendre l'arrivée de la catastrophe pour estimer les besoins, trouver les fournisseurs, passer les marchés, produire et acheminer l'assistance nécessaire, on n'ose imaginer la situation des populations touchées. Pour subvenir de manière efficiente et rapide, des stocks d'urgence doivent être constitués et, dans la mesure du possible, positionnés au plus proche des zones sensibles. Les organisations (gouvernementales et les ONGs) implantent donc des entrepôts dans lesquels elles stockent des produits d'aide d'urgence (hébergement, nourriture, médicaments...).

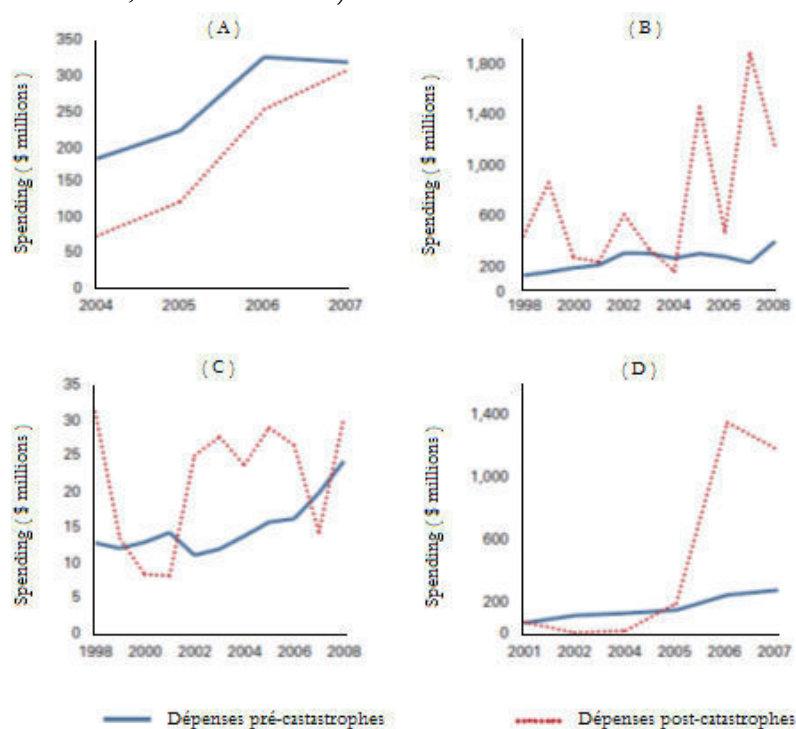


Figure II-6 : Les dépenses post-catastrophe varie en fonction des dépenses pré-catastrophe.

Source : WB (2010).

Après la crise, des experts interviennent ensuite pour définir les schémas logistiques les plus efficaces compte tenu de l'implantation de ces entrepôts et des possibilités logistiques du lieu de la catastrophe (point d'arrivée des marchandises, entrepôts à louer ou à construire, existence de routes sécurisées et des moyens de transport). Au-delà de la réponse en urgence (deux ou trois premiers mois), le plus difficile est souvent d'assurer le réapprovisionnement de ces entrepôts après épuisement des stocks d'urgence. Dans l'humanitaire, les coûts de transport représentent généralement une part élevée du coût global. Un facteur clé de réussite est la capacité à mobiliser des fournisseurs locaux ou régionaux pour limiter les coûts et optimiser le taux de service. Cela nécessite de conduire un travail de fond pour identifier des fournisseurs.

Les objectifs de rapidité d'intervention et de réduction de coûts de transport justifient donc clairement le positionnement d'infrastructures logistiques pour faciliter le déploiement du matériel d'assistance, à la fois pour les opérations d'urgence et pour les opérations long terme. Encore faut-il pré-positionner ces infrastructures de manière stratégique. Deux schémas de pré-positionnement coexistent :

- Le premier consiste à implanter quelques entrepôts sur des *hubs* à grande capacité logistique. Par exemple depuis 2000, l'UNHRD (*United Nations Humanitarian Response Depot*) comporte cinq entrepôts situés à Brindisi (Italie), Accra (Ghana), Dubaï, Subang (Malaisie) et Panama City (Panama). Ceci permet de répondre en urgence à des catastrophes à travers le monde. Parmi les critères à prendre en compte, on peut citer : (i) la facilitation des activités par les autorités, (ii) la cohérence vis-à-vis des opérations en cours ou à venir, (iii) la stabilité politique, (iv) l'accès à des infrastructures de transport fiables, (v) les contraintes à l'importation et à l'exportation, (vi) les opportunités de *sourcing* ;
- Le second consiste à implanter des infrastructures locales ou régionales pour répondre aux catastrophes touchant une région bien ciblée. Ceci favorise l'approvisionnement local, permet de mieux prendre en charge les contraintes et les aléas de distribution dans les derniers kilomètres. C'est cette stratégie que choisissent les gouvernements ou les ONGs travaillant sur des zones où des opérations d'urgence sont régulièrement conduites. Parmi les critères à prendre en compte, il faut retenir la possibilité que ces infrastructures soient elles-mêmes impactées par la crise (cf. Haïti). La performance de la réponse dépend du nombre d'entrepôts de secours répartis sur le territoire.

Constituer des stocks pour répondre rapidement à la demande est une pratique courante dans les chaînes logistiques industrielles (Harrison et van Hoek 2008). Dans le contexte de la distribution, les commandes aléatoires des clients sont satisfaites en utilisant des dépôts pré-assignés (Klibi et Martel, 2012a). Baker (2008) mentionne que les activités des centres de distribution dans la plupart des entreprises sont la clé pour conserver un bon niveau de services clients. Comme l'a noté Frazelle (2002), dans de nombreuses entreprises, les centres de distribution sont essentiels pour réussir son implantation sur le marché. Ils doivent être pleinement intégrés dans la planification et le contrôle des opérations de la chaîne.

Cependant l'existence de ces dépôts ne garantit pas une réponse totalement en adéquation avec la situation. Un réseau de dépôt, surtout s'il est lui-même menacé de perturbations ne sera pas en mesure de répondre adéquatement aux demandes. Le pré-positionnement de stocks importants peut être à risque, particulièrement en situation de crise mais pas seulement, comme le disent Beamon et Kotleba (2006). L'entreposage de secours d'urgence ne constitue de ce fait qu'une partie de la réponse humanitaire. De manière générale, pour satisfaire les commandes reçues un jour donné, une entreprise se repose d'abord sur ses ressources propres pour livrer les commandes et utilise en second lieu des ressources d'appoint internes comme les heures supplémentaires. Si cela ne suffit pas, des ressources externes peuvent être utilisées pour satisfaire tous les clients (ou bénéficiaires). Pour Chakravarty (2014), il est nécessaire d'avoir une approche intégrée et coordonnée qui soit à la fois proactive et réactive, en intégrant des stocks pré-positionnés avec les livraisons en temps réel. Pour Hall (2011), une prévision appropriée de la demande, combinée avec l'entreposage de petites quantités de secours nécessaires et non-périssables, dans des endroits sensibles facilitera l'agilité de la chaîne de secours. Cela permettra également de fournir, en temps opportun, des biens plus ciblés pour les communautés bénéficiaires en attendant l'envoi d'une aide plus massive après une catastrophe. Knemeyer et al. (2009) soulignent que les secours organisés en temps réel, doivent s'appuyer fortement sur une infrastructure logistique.

Une approche complémentaire intéressante serait de disposer de matériel d'assistance offrant des possibilités de *différentiation retardée*. Ceci permettrait de répondre à la demande effective des bénéficiaires. Pour Oloruntoba et Gray (2006), une gestion des stocks répondant au principe de *différentiation retardée* peut s'avérer un substitut rentable au pré-positionnement. Elle permettrait de distribuer les secours aussi rapidement que voulu. Ces fournitures, conservées comme « stock stratégique », seraient ensuite distribués selon l'évolution des besoins des utilisateurs finaux, en se basant sur données plus précises et des informations fiables sur les besoins immédiats des bénéficiaires. La conservation d'un stock générique peut également aider à diminuer les risques de détournement de l'aide ou de violence. Brandimarte et Zotteri (2007) mentionnent également que dans un système multi-échelon la politique optimale de gestion des stocks dépend à la fois des stocks et des politiques de gestion des stocks de tous les autres entrepôts du système qu'ils soient en amont ou en aval.

Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur le sujet de la conception initiale du réseau (approche proactive). La dimension pilotage permettant l'exploitation en temps réel dudit réseau n'est pas abordé (approche réactive). En particulier, nous proposons d'adresser les deux problèmes majeurs du pré-positionnement à savoir :

- Le positionnement en fonction des risques naturels potentiels, de la population impactée, de l'accessibilité des zones touchées. C'est le sujet de la *localisation* ;
- La nature des produits à entreposer et leur quantité. C'est le sujet du *dimensionnement*.

3. Formulation de la problématique retenue et démarche scientifique

3.1. Formulation de la problématique retenue

Il ressort de ce que nous avons décrit que les acteurs de l'humanitaire ont besoin de disposer d'outils d'aide à la décision capables de les aider à concevoir et piloter des organisations, notamment logistiques, qui soient plus performantes. Face à ces challenges, les Chaînes Logistiques Humanitaires (CLH) ont reçu une attention toute particulière ces quinze dernières années, et peuvent désormais être considérées comme un sujet de recherche à part entière. Le nombre de publications a considérablement augmenté durant cette période (20 publications en 1997 sur la base Science Direct contre plus de 200 publications en 2013) et particulièrement ces cinq dernières années. Des auteurs tels que (Altay et Green, 2005 : Van Wassenhove, 2006 : Natarajarathinam et al., 2009 : Peres et al., 2012) ont étudié ce phénomène et ont constaté que la très grande majorité des travaux publiés est basée sur des modèles analytiques (plus de 50 % des articles), et en particulier sur des modèles de programmation mathématique. Pour autant, très peu d'organisations humanitaires (pour ne pas dire aucune) utilisent aujourd'hui dans la pratique de modèles d'optimisation comme outil d'aide à la décision... Ce point démontre le gouffre qui sépare encore aujourd'hui le monde académique du monde des praticiens dans le domaine de la logistique humanitaire. Pour essayer de combler cet écart, des auteurs tels que (Van Wassenhove, 2006 : Kovács et Spens, 2007 : Peres et al., 2012 : Lauras, 2013) ont identifié des pistes de recherche très concrètes et ont émis les suggestions suivantes :

- Les humanitaires évoluant dans des univers très incertains, les scientifiques devraient considérer de façon beaucoup plus systématique ces incertitudes dans le cadre de leurs travaux ;
- Les travaux de recherche devraient être beaucoup plus réalistes en cernant mieux les variables et paramètres de décision du monde humanitaire d'une part, et en s'appuyant sur davantage de données réelles d'autre part ;
- Les chercheurs devraient tenter d'apporter des réponses aux nouvelles exigences d'efficacité qui s'imposent aux organisations humanitaires et ne pas se cantonner au sujet de l'amélioration de la réactivité et de l'efficacité.

Le périmètre d'une chaîne logistique étant très vaste et les problématiques associées nombreuses, nous avons décidé de focaliser notre attention sur le seul problème de la configuration et du dimensionnement d'un réseau logistique humanitaire. En effet, si les problèmes de localisation et de dimensionnement peuvent être aujourd'hui considérés comme assez largement matures sur le plan scientifique, leur mise en œuvre dans le contexte humanitaire se heurte à deux difficultés majeures du fait de l'attrait relativement récent pour les CLH, et du caractère fortement incertain du sujet d'étude :

- Difficulté à accéder aux données nécessaires à l'élaboration et la validation de leurs modèles ;
- Difficulté à considérer le caractère fortement perturbé de la situation une fois que la catastrophe est avérée.

Le présent travail de recherche se propose d'aborder ces difficultés dans le cadre de l'étude de la conception de CLH associées aux catastrophes de type récurrent de petite et moyenne envergures. Il s'agit là d'un sujet central pour les acteurs des CLH contribuant à l'atteinte de leurs objectifs de professionnalisation, de rationalisation et de performance. L'objectif est de savoir où et combien pré-positionner de matériels afin de maximiser la réactivité et l'efficacité de la réponse d'une part, et de minimiser les coûts engendrés d'autre part. Cette conception doit tenir compte des principales difficultés inhérentes au monde humanitaire et particulièrement de l'incertitude sur la demande et sur la disponibilité des infrastructures. En synthèse, le projet de recherche adresse les deux questions suivantes :

- Comment élaborer des prévisions de demande et des scénarios qui intègrent convenablement le caractère incertain des CLH et qui apportent des garanties suffisantes en matière de réalisme ?
- Comment concevoir des CLH qui garantissent de bons niveaux de performance en termes d'efficacité (coûts minimums) et de résilience (capacité à livrer quoi qu'il arrive) ?

3.2. Méthodologie de recherche

Si on se réfère aux typologies de méthodes de recherche évoquées dans la littérature scientifique, nous pouvons affirmer que notre objectif de recherche est de type *appliqué* au sens où notre démarche vise à « répondre à un problème actuel de la société, d'une organisation ou d'une entreprise » (Kothari, 2004). L'approche employée s'apparente à la famille des projets de *recherche-action* puisque notre projet s'est effectué en concertation avec les agents du milieu d'étude (acteurs de la gestion crise au Pérou en l'occurrence) et qu'il existait « une volonté chez les agents de résoudre le problème et une intention chez les chercheurs de faire avancer les connaissances fondamentales associées à ce problème » (Laurencelle, 2005). Enfin, nous pouvons dire que nos développements se sont appuyés sur des travaux de nature *qualitative* (i.e. basés sur des revues de littérature et des entretiens non dirigés) autant que de nature *quantitative* (i.e. basés sur des bases de données) au sens de (Panneerselam, 2004) ou (Kothari, 2004). Notre démarche est au final principalement *inductif* et peut se résumer selon le principe décrit sur la figure suivante (Benyoucef, 2008).

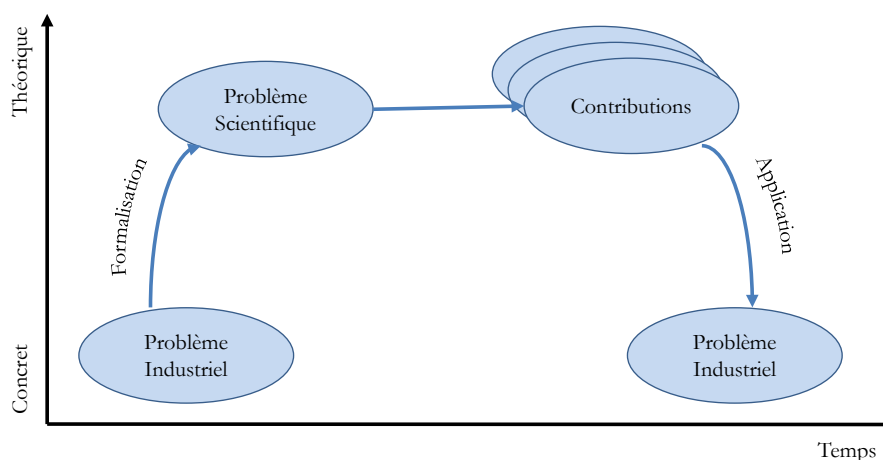


Figure II-7 : Démarche de recherche inductive.

Source : Benyoucef, 2008.

La figure précédente montre que notre approche de la recherche s'appuie sur trois étapes majeures (Benyoucef, 2008) :

- La *formalisation* qui consiste caractériser un problème industriel (terrain) de façon à le formuler comme un problème scientifique. Cette étape inclut la modélisation et la caractérisation du système étudié d'une part, et la formalisation des données nécessaires à la résolution du problème d'autre part ;
- La *résolution* qui consiste à développer des méthodes originales ou à utiliser des méthodes existantes (pour les problèmes scientifiques d'ores et déjà référencés dans la littérature). Dans tous les cas, les pistes de recherche choisies sont développées en profondeur de manière à produire une valeur ajoutée par rapport à la bibliographie ;
- L'*application* qui consiste à mettre en œuvre les propositions faites sur un ou plusieurs cas d'application (idée de recherche finalisée).

En pratique nous avons déroulé l'ensemble de ces trois étapes sur les deux sujets majeurs de notre projet. Ainsi, les étapes de formalisation et de résolution seront développées dans les Chapitres II et III, respectivement pour les sujets relatifs à la prévision de demande et à la définition de scénarios d'une part, et à la conception de réseaux logistiques efficaces et résilients d'autre part. L'étape d'application fait l'objet du Chapitre IV dans le cadre d'une mise en œuvre conjointe de l'ensemble des contributions présentées dans le manuscrit sur le cas des catastrophes récurrentes au Pérou (Chapitre V).

Chapitre III.

METHODOLOGIE POUR LA DEFINITION DE SCENARIOS HUMANITAIRES REALISTES ET REPRESENTATIFS

L'étude approfondie d'un réseau logistique suppose de s'intéresser aux flux, aux profils de demande, aux coûts des structures, au dimensionnement des ressources, à la rotation de stocks, aux objectifs de service, et à beaucoup d'autres facteurs encore. Ces éléments sont particulièrement difficiles à obtenir dans le cadre humanitaire. Le cas de la « demande » est notamment très critique tant l'incertitude y est grande. De prime abord, on peut imaginer qu'il est difficile, voire impossible, de prévoir l'emplacement et l'amplitude de la prochaine catastrophe humanitaire... Et même si l'on pouvait s'en approcher, le contexte serait tellement changeant que les informations deviendraient rapidement erronées ou incomplètes. Pourtant, les acteurs du monde humanitaire ont tout à gagner à pouvoir bénéficier d'outils d'aide à la décision capable de les aider à réaliser leurs missions.

Charles (2010) a démontré qu'une grande majorité des outils disponibles, notamment pour concevoir les réseaux logistiques, sont développées au travers d'approches de type recherche opérationnelle et optimisation. Martel et al. (2013) ont par ailleurs souligné le fait qu'une grande partie de ces propositions étaient déterministes et ne considéraient que trop simplement le caractère incertain de l'humanitaire. Plus récemment, une tendance forte au développement d'approches stochastiques ou floues est apparue. La limite de ces travaux porte souvent sur l'utilisation de données de demande très simplistes qui ne permettent pas de véritablement valider les bénéfices et limites des propositions faites et de réellement donner confiance aux utilisateurs potentiels (Cassidy, 2003 : Murray, 2005 : Charles, 2010 : Martel et al. 2013). C'est pour pallier cette difficulté que plusieurs auteurs ont suggéré de s'intéresser à la réalisation de prévisions de demande en contexte humanitaire et à l'élaboration de scénarios réalistes (Charles, 2010 : Peres et al. 2012 : Braman et al. 2013).

1. Système de prévision des catastrophes et de leurs conséquences

Le sujet même de nos travaux de recherche invite à se poser la question de comment anticiper les futures catastrophes et leurs impacts potentiels. Si cette question a peu de sens dans le cadre de catastrophes majeures de type tsunami en Indonésie en 2004, tremblement de terre en Haïti en 2010, tsunami au Japon en 2011 ou typhon aux Philippines en 2013, le sujet prend tout son sens dans le cadre de crises récurrentes du type de celles que nous souhaitons étudier.

Comme les travaux de (Charles, 2010), (Kovács et al., 2007) ou (Peres et al., 2012) l'ont démontré, l'occurrence de catastrophes récurrentes n'est pas si imprévisible que ce que le sens commun peut laisser croire. Sur cette base, et dans le cas exclusif des catastrophes récurrentes, nous émettons l'hypothèse qu'un système de prévisions doit pouvoir être établi. L'objectif étant de pouvoir disposer d'une estimation réaliste de la future « demande » à laquelle les chaînes logistiques humanitaires devront répondre.

Pour alimenter cette réflexion, nous proposons dans cette section un rapide tour d'horizon du sujet de l'estimation de la demande d'abord par le prisme traditionnel de l'industrie, puis par celui de la gestion de crises. Dans un deuxième temps, nous proposerons une méthodologie instrumentée susceptible de concrétiser l'établissement de prévisions de besoin pour le cas des catastrophes récurrentes.

1.1. Revue de littérature

1.1.1. *Les prévisions dans le monde commercial*

La plupart des entreprises doivent planifier leurs activités en anticipant les besoins de leurs clients. En particulier, les entreprises qui assemblent à la commande ou celles qui livrent sur stock déclenchent leurs approvisionnements et leurs productions sur du prévisionnel. Pour y arriver, elles s'appuient sur des systèmes de planification. Ces systèmes se déclinent le plus souvent sur trois niveaux dits « stratégique », « tactique » et « opérationnel ».

Le niveau stratégique a pour objectif de positionner l'entreprise sur le marché dans son ensemble (dans le cadre de sa stratégie générale). Les étapes essentielles en sont (Bourbonnais et Usunier, 2001 : Hadj-Hamou, 2004 : Dupont et Lauras, 2008) :

- Prévoir ce que sera la demande sur le long terme ;
- Considérer les risques et opportunités de l'environnement (concurrence, fournisseurs, évolution des législations et des technologies...) ;
- Déterminer les parts de marché visés.
- Fixer les types d'activité : faire ou faire-faire (*make or buy*) ;
- Choisir le type d'approvisionnement (mono ou multi sources) et sélectionner les fournisseurs ;
- Dessiner le réseau logistique (implantation et dimensionnement des divers sites de production et stockage, réseau de distribution et transport).

Le niveau tactique correspond aux décisions à moyen terme dans le respect des décisions définies par la planification stratégique (Plan Industriel et Commercial). Les étapes essentielles sont (Bourbonnais et Usunier, 2001 : Hadj-Hamou, 2004 : Dupont et Luras, 2008) :

- Prévoir ce que sera la demande et/ou les ventes sur le moyen terme ;
- Déterminer les plans de production permettant de satisfaire au mieux la demande compte tenu des capacités de production et de sous-traitance, de la disponibilité des ressources matérielles et humaines, des stocks existant ;
- Répartir la production entre les sites (CRP : dimensionnement des capacités de production et des effectifs), affecter les demandes aux centres de distribution et planifier les transports (DRP : plan de distribution) ;
- Déclencher les approvisionnements.

Le niveau opérationnel traite des problèmes d'affectation et de contrôle des flux physiques sur le court terme. Il repose essentiellement sur le Programme Directeur de Production (PDP) qui précise pour chaque produit fini, les quantités à produire, période par période (Bourbonnais et Usunier, 2001 : Hadj-Hamou, 2004 : Dupont et Luras, 2008).

Comme on peut le constater, la prévision de la demande et/ou du marché est la toute première étape des niveaux stratégiques et tactiques. La prévision est une étape essentielle d'un processus de planification de la chaîne logistique (cf. figure suivante). La performance globale de la chaîne logistique dépend directement de la qualité de ces prévisions. Elles conditionnent dans de nombreux cas la performance, la fiabilité et la productivité générale du système. Les principaux bénéfices à attendre d'une bonne prévision sont :

- La réduction des niveaux de stock de sécurité ;
- Un ajustement des stocks de produits finis sur la politique commerciale voulue (taux de service) ;
- La réduction des risques d'obsolescence des stocks ;
- Une meilleure productivité et réactivité des unités de production ;
- L'optimisation de la chaîne de distribution.

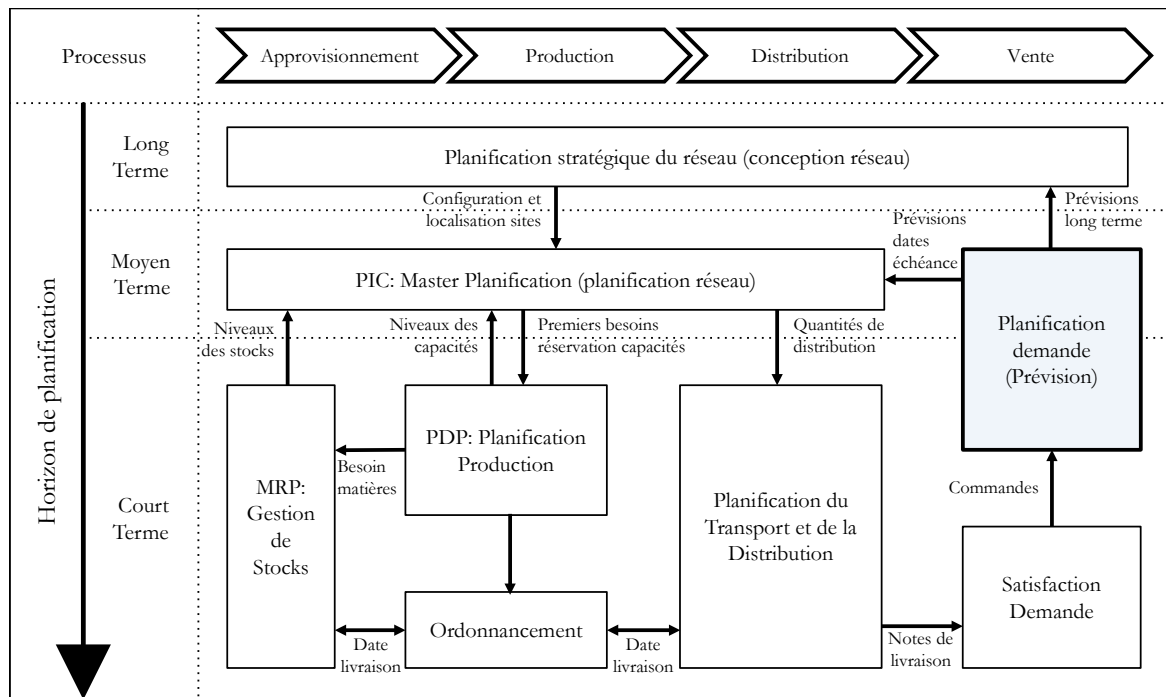


Figure III-1 : La prévision dans le processus de planification des chaînes logistiques.

Source : Hadj-Hamou (2004).

A l'évidence, les prévisions de demande sont utilisées avec des finalités différentes par des acteurs différents de la chaîne logistique. Dès lors lesdits acteurs devront prendre garde à (Bourbonnais et Usunier, 2001 : Dupont et Lauras, 2008) :

- Ne pas confondre objectif et prévision ;
- Ne pas confondre prévision de demande et prévision de vente ;
- Adapter le niveau de réalisation des prévisions au besoin d'utilisation ;
- Déterminer judicieusement le profil et les compétences des prévisionnistes.

Il existe diverses méthodes pour obtenir des prévisions. Ces méthodes reposent implicitement sur l'idée qu'il est possible de prévoir la demande future du produit étudié en se basant sur un certain référentiel de connaissance. Les méthodes de prévision dépendent de la manière de construire ce référentiel. Pour un produit totalement nouveau ou récent sur le marché, on utilise l'avis d'expert ou les informations recueillies en testant le produit sur un panel restreint d'utilisateurs potentiels. Lorsque le produit (ou des produits similaires) sont déjà présents sur le marché, on utilise la connaissance du passé pour extrapoler le futur. Deux phases sont alors nécessaires pour établir une prévision (Bourbonnais et Usunier, 2001) :

- La modélisation du passé ;
- L'extrapolation.

Ainsi, pour estimer des prévisions de demande, une entreprise doit utiliser d'une part les connaissances qu'elle a des marchés et de leurs évolutions (informations externes) et d'autre part, les connaissances qu'elle a d'elle-même et de son évolution (informations internes). La figure suivante illustre cette démarche.

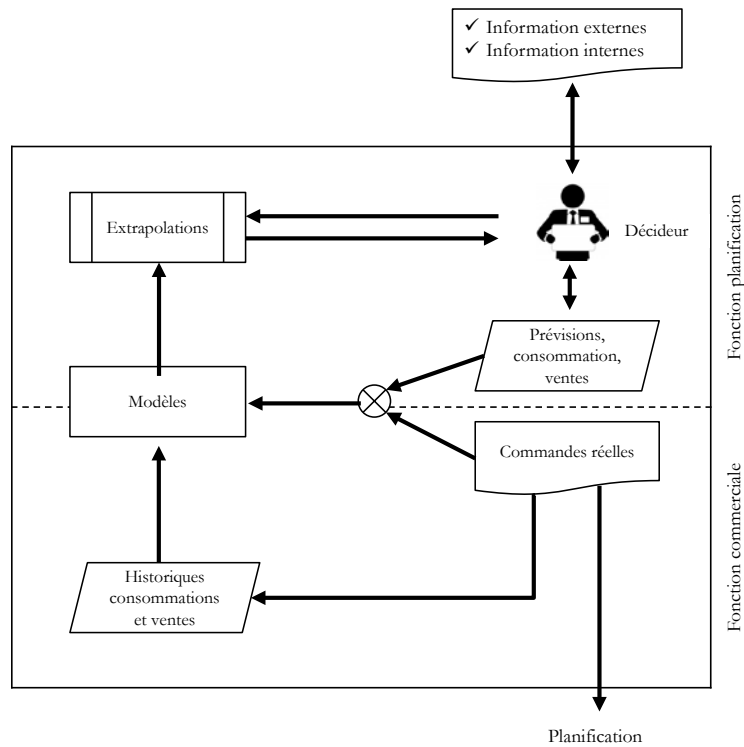


Figure III-2 : De la donnée à la prévision.

D'après Bourbonnais et Usunier (2001).

La figure suivante présente les grandes étapes d'un système de prévision des ventes dans le monde commercial. Avant toute chose, il convient de collecter les données qui serviront à la modélisation du passé. Ces données devront être fiables et en nombre suffisant. Ensuite, vient la méthode de prévision à proprement parlée quelle qu'elle soit. Le traitement est alors informatisé et les données éventuellement mises à jour. La prévision peut alors être définie et validée avant d'être diffusée auprès de l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique qui travaillent avec.

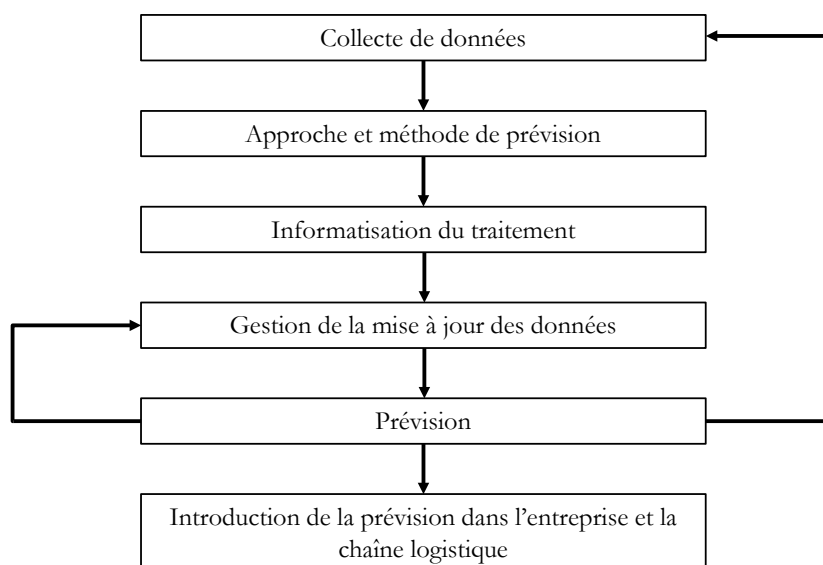


Figure III-3 : Le processus de prévision.

D'après Hadj-Hamou (2004).

Les informations utilisées peuvent être quantitatives (constituées de données chiffrées) ou qualitatives (basées sur des opinions). Les techniques et outils sur lesquels reposent les méthodes de prévisions dépendent bien évidemment de la nature de ces données.

Les méthodes quantitatives partent de données chiffrées. Ces données peuvent être internes à l'entreprise : historique de ventes mensuelles, chiffre d'affaire réalisé au cours des dernières années. On parle alors de méthodes quantitatives endogènes. Mais elles peuvent aussi provenir de l'environnement extérieur (indices des prix, indices économiques, ventes d'autres produits complémentaires ...). On parle alors de méthodes quantitatives exogènes. Ces méthodes sont faciles à mettre en place (un tableur est suffisant pour les calculs). Elles sont simples et rapides à utiliser lorsque le modèle a été développé. Les principaux logiciels du marché les proposent. Les données nécessaires existent le plus souvent dans les systèmes d'information des entreprises (ex. ventes des mois passés) ou sont faciles à trouver (ex. indices économiques).

Lorsqu'on dispose d'un historique suffisant, on va extrapoler cet historique pour obtenir les prévisions. On parle alors d'analyse des séries chronologiques. Les principales méthodes d'analyse des séries chronologiques en production manufacturière sont la moyenne mobile, le lissage exponentiel simple, double (modèle de Holt) ou triple (modèle Holt-Winters) et les méthodes de Box-Jenkins. D'autres méthodes issues du monde économique existent également telles que les modèles économétriques *Inputs/Outputs* (dont *the Regional Economic Modeling System*, REMI et *the Computable Equilibrium Models*). Elles forment le gros des méthodes de prévision proposées par les logiciels du marché. Leur inconvénient principal est leur faible capacité à prendre en compte des facteurs «nouveaux» ou imprévus. La longueur de l'historique est importante. Par exemple, si les ventes sont saisonnières sur une année, il faut disposer d'au moins deux années d'historiques. Dans le cas contraire, les prévisions relèvent du domaine de l'expertise. Pour certains produits, il est possible de relier la demande aux ventes réalisées antérieurement sur d'autres produits (les pièces de rechange par exemple) ou sur des faits passés (la vente de petits pots bébé est liée aux naissances des mois précédents). Lorsqu'il est possible de corrélérer la demande avec des phénomènes sur lesquels on dispose de données statistiques fiables, on utilise des méthodes de corrélation et l'économétrie.

Les méthodes quantitatives s'appuient sur des données. Or, les données dont on dispose, bien qu'elles soient vraies et reflètent la réalité, ne sont pas forcément exploitables telles quelles dans les calculs. Pour un certain nombre de raisons, les données brutes ne sont pas toujours homogènes ou induisent des biais. Il faut donc procéder à un nettoyage préliminaire des données avant de les utiliser (ou en termes plus précis : redresser les chroniques). Inversement, il faudra parfois redresser les prévisions issues des calculs pour tenir compte d'évènements à venir connus (promotions, vacances...).

Dans les méthodes dites qualitatives (parce qu'on n'y traite pas des chiffres et des quantités), on utilise des données subjectives. Ces données dépendent du jugement, de l'expérience et de l'expertise de certains acteurs. Elles sont les seules envisageables lorsqu'il existe très peu de données sur le produit étudié (introduction d'un nouveau produit ou pénétration d'un nouveau

marché, entreprise en démarrage). Les méthodes les plus connues sont la méthode du sondage ou la méthode Delphi. Ces méthodes se basent sur :

- Les opinions d'experts ;
- Les opinions des consommateurs (enquête d'intention ou marché test) ;
- Les opinions des vendeurs et des commerciaux.

Le principal avantage de ces méthodes est de pouvoir prendre en compte de facteurs intangibles. Bien qu'elles soient moins rigoureuses et mathématiques que les méthodes quantitatives, elles peuvent se révéler aussi extrêmement fécondes par les informations qu'elles apportent. Le *brainstorming* (le déballage d'idée) qu'elle provoque peut permettre, non seulement d'aboutir à une prévision, mais aussi de faire naître des idées sur l'évolution du marché, les causes d'achat ou de non-achat du produit étudié, des pistes d'amélioration... A l'inverse, elles comportent des inconvénients tels que :

- La durée du processus de consultation (étude de marché) ;
- Le risque d'obtenir une prévision biaisée ou arbitraire (bon vouloir des commerciaux) ;
- Un coût souvent élevé (consultation d'experts) ;
- Elles sont en général peu précises.

Le choix d'une méthode est fonction du contexte : existence ou non de données chiffrées, stabilité du contexte socio-économique sur l'horizon d'étude. Lorsque c'est possible, il est intéressant de panacher les deux approches qualitatives et quantitatives. De plus, l'éventail des méthodes quantitatives étant assez large et les logiciels du marché en donnant un large éventail, il est utile de recouper les prévisions issues de plusieurs de ces méthodes.

Malgré tous les efforts, les prévisions restent une science inexacte. Pour mettre toutes les chances de son côté, les prévisions doivent être recoupées, voire modifiées par les informations connues par ailleurs : on se renseignera par exemple sur les campagnes publicitaires prévues au service marketing, les négociations en cours au service commercial, les nouveautés attendues chez les concurrents, le lancement d'un nouveau produit pouvant concurrencer le produit étudié. Les prévisions doivent être partagées et validées par les divers services de l'entreprise : logistique, commercial ou marketing. On parle alors de prévisions collaboratives. Ces prévisions collaboratives peuvent inclure les partenaires extérieurs et intégrer des fournisseurs ou des clients.

1.1.2. Les prévisions dans le monde humanitaire

La notion de prévision renvoie au sujet de l'objet considéré et de la demande associée. Dans le cadre d'une catastrophe, l'objet concerne avant toute chose les victimes du désastre. La demande, elle, porte sur la quantité de matériels, produits et de services qu'il convient d'apporter pour soulager lesdites victimes (Quarantelli, 2005). Parler de prévision dans le monde de la gestion de crise, revient à s'intéresser à deux choses :

- La probabilité de survenue d'un événement perturbateur (tremblement de terre, inondation, cyclone, etc.) ;
- L'estimation des conséquences potentielles de la survenue de cet événement (impact sur les infrastructures, victimes, etc.).

Si depuis longtemps on essaie d'anticiper la survenue de catastrophes (notamment par l'étude de phénomènes climatologiques ou géologiques), un rapide tour d'horizon de l'état de l'art sur la gestion de crises montre que peu ou pas de travaux se sont intéressés à l'évaluation *a priori* des conséquences d'une catastrophe. La plupart des travaux existants s'intéressent à l'estimation des conséquences d'une crise une fois que celle-ci est survenue (McEntire et Cope, 2004 : Clower, 2007 : Xu et al., 2010 : Zhang et al., 2013). On parle alors d'évaluation *a posteriori*. Les principales méthodes existantes pour réaliser ce genre d'évaluation sont (Clower, 2007) :

- Les enquêtes : elles présentent l'avantage de capter des informations directement auprès de ceux qui ont subi la catastrophe (UNISDR, 2013). Les supports utilisés sont très variables et peuvent traiter tout autant de données matérielles, sensorielles, économiques ou sociales. Les enquêtes se déclinent également sur des niveaux de granularité plus ou moins important selon les besoins. Le plus grand problème avec ces approches porte sur le biais évident des réponses et sur la représentativité des échantillons retenus. Rose et Liao (2005) proposent une étude critique de ce genre d'approche notamment en s'intéressant aux enquêtes utilisées pour évaluer les impacts des inondations du centre-ouest des Etats-Unis en 1993 et du tremblement de terre de Northridge en 1994 ;
- La comptabilité économique : il s'agit d'établir le bilan économique complet d'une catastrophe (Zimmerman et al. 2005). Si certaines conséquences sont assez évidentes à chiffrer, d'autres sont beaucoup plus délicates à estimer (Mileti, 1999 : Cochrane, 2004). C'est le cas évidemment de la dimension humaine (personnes décédées, blessées, etc.) mais également d'éléments comme la perte de monuments historiques, de biens culturels (Mileti, 1999) ou l'intervention de bénévoles dans le cadre de la réponse à la crise (McEntire et Dawson, 2007).

Dans les deux cas, le débat porte alors souvent sur l'estimation des coûts d'une catastrophe et notamment sur la distinction entre coûts directs et coûts indirects. Rose (2004) par exemple aborde cette question en s'intéressant aux conséquences d'une catastrophe qui impacte une centrale électrique. Au total, il est possible de considérer que les effets directs sont ceux qui sont directement visibles après la survenue de la catastrophe (Cochrane, 2004) alors que les effets indirects sont ceux qui seront visibles sur le long terme. De ces premiers éléments, nous pouvons en conclure que la notion de prévision dans un contexte de crise pourra distinguer les deux types de conséquences. Dans nos travaux, nous nous focaliserons uniquement sur l'estimation des conséquences directes.

D'après Clower (2007), il existe également des techniques d'évaluation *a priori* qui sont susceptibles d'être utilisées pour évaluer les effets directs et indirects d'une catastrophe. Et quelques expériences ont d'ailleurs déjà été menées. Ainsi, Nury et al. (2013) utilisent une approche de type Box Jenkins pour prévoir les futurs phénomènes climatologiques (variation de température) du Bangladesh. Greenberg et al. (2007) pour leur part suggèrent d'utiliser une approche économétrique pour anticiper la survenue de catastrophes et d'anticiper les conséquences économiques potentielles même s'ils précisent qu'il n'y a pas aujourd'hui de cas

documentés dans la littérature. Pourtant, de nombreuses institutions publiques américaines se laissent tenter par ces approches et achètent des logiciels proposant ce genre de modèles.

Le sujet de la prévision de demande en cas de crise humanitaire pose question. Ortuño et al. (2013) mentionnent que la nature même des crises, y compris récurrentes, rend délicat toute forme d'anticipation que ce soit pour prévoir l'occurrence ou les conséquences. Pourtant, si on s'intéresse un instant aux catastrophes passées, il est possible de tirer de nombreux enseignements qui mettent à mal ce point de vue si répandu. Nous nous sommes notamment intéressés à la base de données *International Disaster Database*, EM-DAT (<http://www.emdat.be/>), qui contient des données sur les caractéristiques et les effets de plus de 18000 catastrophes survenues dans le monde depuis 1900 jusqu'à nos jours.

Un premier constat concerne le fait que la donnée sur l'occurrence des crises (humanitaires notamment) est disponible et globalement bien renseigné (en tout cas sur une période d'un siècle environ). Comme indiqué précédemment, de nombreux travaux ont d'ores et déjà tenté d'exploiter cette connaissance pour établir des modèles de prévision capables de déterminer les futures événements climatologiques ou géologiques (inondation, éruption volcanique, tremblement de terre, tempêtes, etc.) susceptibles d'être à l'origine de catastrophes humanitaires. Les travaux du (WGCEP, 2008) sur la prévision de futurs tremblements de terre sont à cet égard particulièrement représentatifs de ce qu'il est aujourd'hui possible de faire. La précision de l'estimation tant en matière de localisation, de magnitude que de date est assez remarquable. Dans le même esprit on retiendra les travaux de (Li et al. 2012 ; Braman et al. 2013) sur les inondations ou ceux de (Tatham et al. 2012) sur les cyclones. Une autre idée couramment évoquée porte sur le fait qu'il y aurait de plus en plus de catastrophes et que la nature même des catastrophes est en train de changer. Il serait présomptueux d'aller à l'encontre de cette affirmation dans un contexte de bouleversement climatique avéré. Néanmoins les proportions ne sont sans doute pas celles que l'on croit. Ainsi, les travaux de (IFRC, 2007 : IPCC, 2007 : Charles et al. 2010) démontrent que s'il y a bien une tendance à la démultiplication des catastrophes, leur ampleur moyenne, elle, a tendance à diminuer. Au travers d'une étude détaillée sur une période de 10 ans, (Charles, 2010) démontre que les événements ne sont pas si aléatoires qu'on pourrait le penser (fréquence et intensité globalement constantes sur la période). D'autres chercheurs tels que Peres et al. (2012) ou Kovács et al. (2007) considèrent que pour les petites et moyennes catastrophes, les futures occurrences seront globalement similaires aux précédentes. Nous retenons de cette partie de notre analyse qu'il est raisonnable de considérer que des méthodes de prévision de l'occurrence de futures catastrophes existent ou sont susceptibles d'exister, dès lors que nous nous limitons à l'étude de crises de nature récurrente. Dans la pratique, les analyses des données des catastrophes passées permettent de fournir des informations précieuses sur les tendances à venir (localisation, intensité, typologie et la saisonnalité, etc.).

Pour autant, le sujet va bien au-delà de la simple estimation de l'événement à venir. La question des conséquences potentielles associées audit événement doit également être traitée. Et comme cela a été dit dans le chapitre précédent, cette question fait référence à de nombreuses notions telles que la vulnérabilité et la résilience des territoires. Or, bien plus que l'occurrence des catastrophes, ce sont les caractéristiques des territoires impactés qui évoluent au cours du temps

(Charles, 2010). L'enjeu de la prévision de demande dans un contexte de catastrophe humanitaire semble donc porter sur cet aspect des choses et sur la capacité à estimer *a priori* l'impact associé à la survenue de telle ou telle catastrophe (Comes et al. 2014). Plusieurs auteurs ont proposé des solutions permettant d'adresser le sujet de la prévision dans le monde humanitaire. On trouve notamment les travaux de :

- Beamon et Balcik (2008), dans le cadre d'un sujet sur la conception de chaîne logistique humanitaire, estiment la demande future à partir d'une extrapolation sur la densité de population de la zone concernée. Les auteurs eux-mêmes évoquent les limites de cette approche qui, à défaut d'être robuste, permet au moins de considérer une dynamique temporelle des situations à traiter dans le futur ;
- Dans le cadre d'un travail sur la logistique d'urgence, Sheu (2007) propose de son côté une approche linéaire d'estimation de la demande future basée sur une fonction temps. Ici encore, l'hypothèse de départ est très restrictive et l'approche ne permet en aucun cas de tenir compte des spécificités des territoires et de leur évolution au cours du temps ;
- Lodree et Taskin (2009) abordent le problème de l'organisation logistique des supermarchés face aux surtensions de la demande causées par les ouragans. Les auteurs supposent que la demande est directement proportionnelle à la vitesse prévue du vent des ouragans. De leur côté, Taskin et Lodree (2010) développent un modèle stochastique de programmation multi-période pour gérer les décisions de planification de la production avant la saison des ouragans. La demande de produits est fonction de la quantité des ouragans prévus pour la prochaine saison. Cette estimation est notamment déterminée à partir d'un modèle de taux de probabilité utilisant les Chaînes de Markov. Dans les deux études, les approches préconisées sont très orientées industrie et ne permettent pas d'envisager le dimensionnement et la gestion des chaînes logistiques humanitaires ;
- Rawls et Turnquist (2010) ont proposé un modèle de prévision basé sur l'étude des ouragans ayant frappés les Etats-Unis par le passé. A l'image des travaux de (Charles, 2010 : Salmeron et Apte, 2010) et de beaucoup d'autres, le modèle de prévision se contente ici de reproduire le passé. C'est sans doute l'approche la plus répandue aujourd'hui dans la littérature. L'ensemble des éléments que nous avons développé précédemment indiquent que ces approches, loin d'être dénuées de sens, sont sans doute insuffisantes, notamment parce qu'elles ne considèrent pas suffisamment des critères tels que l'évolution de la vulnérabilité et la résilience des territoires ;
- Kumar et al. (2012) ont analysés non pas les catastrophes passées, mais les conséquences des catastrophes passées. Ils ont ainsi démontré que, à l'échelle de la planète, il était possible de modéliser la répartition des victimes par une distribution de probabilité de Weibull. L'utilisation de cette distribution permet alors aux auteurs de prévoir le nombre de personnes qui seront affectées par des catastrophes naturelles dans les années à venir. Si le résultat de cette recherche semble assez probant, le caractère très macroscopique (loi des grands nombres) de l'approche empêche toute transposition réaliste à des cas plus précis ;
- Davis et al. (2013) explorent quant à eux le terrain des prévisions court terme pour l'aide au pilotage des chaînes logistiques humanitaires. Ils s'intéressent notamment au

cas des ouragans. Ces travaux, bien que tout à fait convaincants, sont en décalage par rapport au sujet de cette thèse qui s'intéresse à l'établissement de décision d'ordre stratégique telle que la conception de chaîne logistique humanitaire.

Au final, il ressort de cette section que les outils et démarches actuels considèrent qu'il n'est pas possible de prévoir les conséquences des futures catastrophes humanitaires. Or, pour certaines d'entre elles (catastrophes récurrentes de petites et moyennes envergures), l'analyse des historiques montrent que l'on répond aux hypothèses de fonctionnement des systèmes de prévision traditionnels. Une transposition est donc sans doute envisageable à la condition que l'on prenne garde à travailler de manière concomitante sur la prévision d'occurrence de l'événement déclencheur et sur la prévision des conséquences (impacts) associées à cette catastrophe. L'objet de la prochaine section est de proposer une méthodologie instrumentée permettant d'atteindre cet objectif.

1.2. Contribution n° 1 : modèle de prévision de la demande pour des catastrophes récurrentes

1.2.1. Principes généraux

En cohérence avec ce que nous venons de développer, rappelons que l'objectif poursuivi est de donner de la consistance aux outils d'aide à la décision que tel ou tel est susceptible de proposer en les éprouvant sur des données quantifiées et réalistes. Des auteurs tels que (Charles, 2010 : Braman et al. 2013) ont démontré récemment les bénéfices potentiels qui seraient associées à l'obtention de telles prévisions de demande sans pour autant proposer de méthode concrète de mise en œuvre.

Conformément aux travaux de (IFRC, 2007 : IPCC, 2007 : Kovács et al. 2007 : Charles, 2010 : EM-DAT, 2011 : Peres et al. 2012 : Braman et al. 2013), nous émettons l'hypothèse qu'il est possible de prévoir les catastrophes futures (de type récurrentes uniquement) en fonction des catastrophes passées. En termes statistiques, il s'agit de considérer que les catastrophes récurrentes répondent aux hypothèses des modèles de prévisions de type endogène. En fonction des types de phénomènes étudiés (tremblement de terre, inondations, cyclones, etc.), de la localisation et des niveaux de granularité visés (temporel, géographique, etc.), l'estimation de l'occurrence peut varier du plus simple au plus complexe. Le modèle le plus simple consiste souvent à considérer que les événements futurs reprendront peu ou prou les événements passés. C'est cette hypothèse que nous retrouvons aujourd'hui dans la très grande majorité des travaux de recherche publiés (Charles, 2010 : Peres et al. 2012 : Galindo et Batta, 2013). Cette hypothèse peut être considérée comme valide dès lors que les informations sont gérées et utilisées de manière relativement agrégée, c'est à dire pour alimenter des décisions d'ordre stratégique ou tactique. Par exemple, dans les travaux de (Charles, 2010), il s'agit de travailler à l'échelle de la planète et sur un horizon de temps pluriannuel. Dans d'autres cas, nécessitant plus de précision (décision opérationnelle), des spécialistes de tel ou tel phénomène géologique ou climatique sont en capacité de proposer des modèles de prévision d'occurrence spécifiques à un terrain d'application et sur un horizon de temps plus fin. C'est notamment le cas des travaux de (Li et al. 2012 : Braman et al. 2013) sur les inondations, du (WGCEP, 2008) sur les tremblements de terre ou ceux de (Tatham et al. 2012) sur les cyclones. Dans le cadre de notre étude, nous nous

intéressons aux décisions d'ordre stratégique, dans un contexte de catastrophes récurrentes quelque soit leur nature (inondations, tremblements de terre, cyclones, etc.). Aussi, nous retiendrons pour la suite l'hypothèse d'un modèle de prévision des occurrences futures basée sur la reconduction de phénomènes passés.

Néanmoins l'objet de notre proposition est bien d'aller au-delà de la prévision d'occurrence en s'intéressant notamment à l'établissement d'une prévision d'impact de la future catastrophe. Pour ce faire, nous proposons une démarche en 4 étapes telles que décrites dans la figure suivante :

1. Identifier l'ensemble des facteurs d'influence qui sont susceptibles d'expliquer le lien entre la survenue d'une catastrophe et ses conséquences attendues ;
2. Sélectionner, parmi cet ensemble, les facteurs discriminants pour un type de catastrophe et un territoire donnés ;
3. Etablir la fonction de corrélation associée au contexte particulier étudié ;
4. Valider le modèle de prévision.

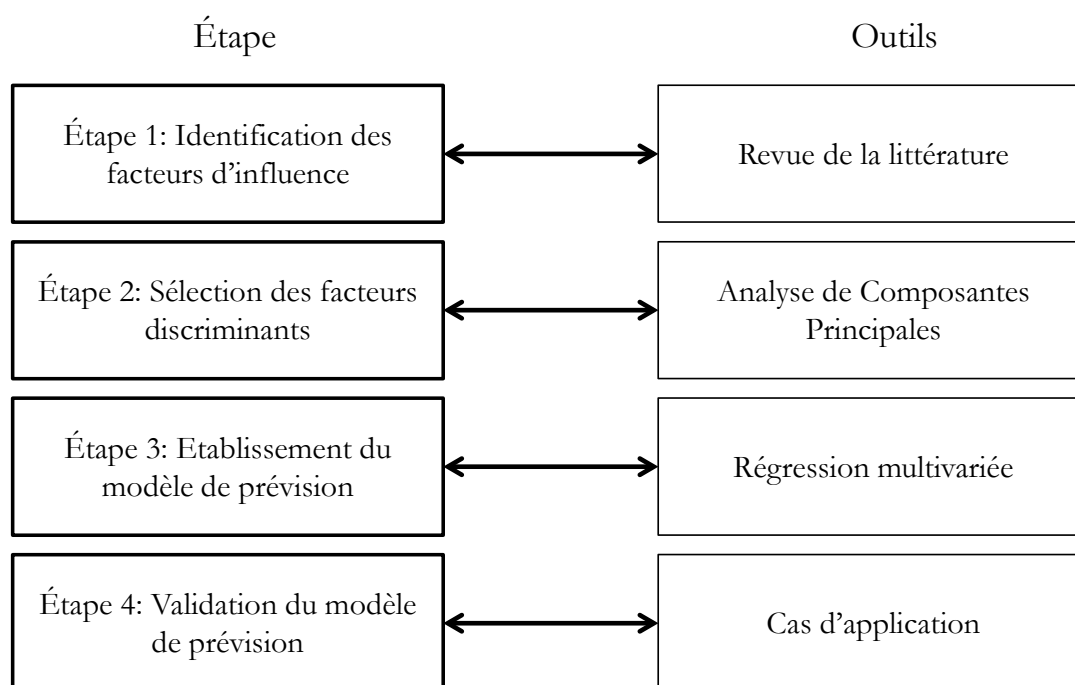


Figure III-4 : Méthodologie de la prévision en cas de crises.

1.2.1.1. Etape 1 : Identification des facteurs d'influence.

Cette étape s'appuie sur une revue de la littérature permettant de comprendre les liens existant entre la survenue d'une catastrophe et ses conséquences directes. Au-delà des éléments précédemment présentés, Wisner et al. (2004) ont démontré il y a dix ans déjà, que l'impact d'une catastrophe est directement fonction de la vulnérabilité (telle que définie dans le chapitre précédent). Des travaux plus récents (Peres et al. 2012 ; Ortuño et al. 2013) ont quant à eux souligné le lien qui existe entre la résilience (telle que définie également au chapitre précédent) et l'impact d'une catastrophe.

Cette double dépendance est reprise par (UNESCAP, 2008) et peut être synthétisée par la formule suivante :

$$\text{Impact d'une catastrophe} = f(\text{vulnérabilité, résilience}) \quad (1)$$

Dès lors, il convient de s'intéresser en détail aux facteurs qui sont susceptibles de qualifier et quantifier les concepts de vulnérabilité d'une part et de résilience d'autre part, pour les événements récurrents ou cycliques. L'analyse des travaux de (Hardy, 2001 : UNDP, 2004 : D'Ercole et al. 2009 : Alinovi et al. 2009 : D'Ercole et al. 2012 : Metzger et al. 2013) ont permis de mettre au jour des dizaines de facteurs de caractérisation de ces notions. Les deux tableaux suivants reprennent chacun de ces facteurs. Ils précisent aussi, lorsque c'est possible, les sources (bases de données) auprès desquelles il est possible de récupérer les données quantitatives. Selon les facteurs, ces bases sont internationales ou nationales. Dans ce dernier cas, les bases citées ici sont les bases péruviennes utilisées pour l'étude de cas du dernier chapitre.

Ce travail bibliographique montre que la vulnérabilité peut théoriquement revêtir plusieurs dimensions complémentaires. Il y a notamment les données relatives au contexte et aux activités économiques du territoire concerné. On doit également considérer les données environnementales, démographiques et sanitaires. Le niveau d'éducation est également prépondérant, au même titre que les capacités de développement humain. L'accès aux ressources et la qualité intrinsèque des infrastructures constituent également une catégorie à retenir. Enfin, la vulnérabilité de la réponse humanitaire doit être considérée.

Catégorie	Facteurs de caractérisation de la vulnérabilité	Base de données exploitable
Contexte économique	Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant	WB ¹
	Indice de pauvreté humaine (IPH)	UNDP ²
	Balance commerciale (% des exportations de biens et services)	WB
	Inflation annuelle (%)	WB
	Taux de chômage (% de la population active totale)	ILO ³
Type des activités économiques	Surfaces agricoles (en milliers d'hectares)	FAO ⁴
	Ratio de terres arables	FAO
	Taux d'urbanisation	UNPOP ⁵
	Part de l'agriculture dans le Produit National Brut (PNB)	WB / FAO
Démographie	Taux de croissance démographique	UNDESA
	Taux de croissance des centres urbains	GRID ⁶
	Densité de population	GRID ⁷
	L'âge de dépendance	WB

Table III-1 : Les facteurs de caractérisation de la vulnérabilité - Partie 1.

D'après UNDP (2004), Metzger et al. (2013), D'Ercole et al (2009) et Hardy (2001).

¹ WB: La Banque Mondiale (*The World Bank*).

² UNDP : Le Programme de Développement des Nations Unies (*The United Nations Development Program*).

³ ILO : Le Bureau International du Travail (*The International Labor Office*).

⁴ FAO : L'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (*The Food and Agriculture Organization*).

⁵ UNPOP : La Division des Nations Unies pour la population (*The United Nations Population Division*).

⁶ Le calcul a été fait utilisant les données du Département des Affaires Sociales et Economiques des Nations Unies

⁷ Le calcul a été fait avec la modélisation spatiale de l'UNEP/GRID avec les données de la population en CIESIN.

Santé et hygiène	Nombre de médecins (pour 1000 habitants)	WB
	Nombre de lits dans les hôpitaux (pour 1000 habitants)	WB
	Espérance de vie à la naissance	UNDESA ¹
	Taux de mortalité infantile (moins de 5 ans)	UNDESA
Qualité de l'environnement	Surfaces forestières (en % de la superficie du territoire)	FAO
	Indice GLASOD (niveau de dégradation des sols par l'homme)	FAO/UNEP ²
Capacité d'alerte	Nombre de radios ou équivalents (pour 1000 habitants)	WB
Éducation	Taux d'alphabétisation	WB
Développement	Indice de Développement Humain (IDH)	UNDP
Exposition	Exposition aux risques géologiques (séismes, inondations, etc.)	IGP ³
Accès aux ressources	Accessibilité des ressources en situation d'urgence	INDECI
Vulnérabilité structurelle et fonctionnelle	Vulnérabilité des infrastructures (ponts, chemins de fers, échangeurs, aéroports, etc.) vis-à-vis du fonctionnement nominal des ressources de première nécessité (hôpitaux, pompiers, etc.).	N/A
Accès aux ressources et connaissance de la vulnérabilité de la population	L'accès aux ressources	INEI
	Pyramide des âges	INEI
	Part de la population ayant accès aux services sanitaires élémentaires	INEI
	Part de la population n'ayant pas accès aux services sanitaires élémentaires	INEI
	Densité familiale moyenne (nombre de personnes par foyer)	INEI
	Taux de raccordement à l'eau potable	INEI
	Taux de raccordement aux systèmes d'évacuation des eaux usés	INEI
	Taux de raccordement aux réseaux électriques	INEI
	Taux d'habitation précaire (terre battue, murs fragiles, etc.)	INEI
	Taux de population déplacée	INEI
	Taux d'immigration	INEI
	Taux de couverture des réseaux de transport public	INEI
	Taux d'éducation	INEI
Vulnérabilité de la réponse humanitaire	Niveau de coordination nationale des crises	INDECI
	Qualité des secours	INDECI
	Maturité et expertise des organisations de secours	INDECI
	Disponibilité des ressources dédiées aux réponses humanitaires	INDECI
	Disponibilité des centres d'approvisionnement d'eau	INDECI
	Disponibilité des centres d'approvisionnement de nourriture	INDECI
	Disponibilité des centres de santé	INDECI
	Disponibilité des réseaux de télécommunication et d'énergie	INDECI
	Disponibilité des moyens de transport et des routes	INDECI
	Disponibilité d'abris et établissement de refuge	INDECI
	Disponibilité de ressources de stockage et traitement des déchets	INDECI
	Assise financière des acteurs de la réponse	INDECI
	Niveau de visibilité (risques, vulnérabilité, etc.) du territoire	INDECI

Table III-2 : Les facteurs de caractérisation de la vulnérabilité - Partie 2.

D'après UNDP (2004), Metzger et al. (2013), D'Ercole et al (2009) et Hardy (2001).

¹ UNDESA : Le Département des Affaires Sociales et Economiques des Nations Unies/Division Population.

² UNEP : L'Equipe pour les Perspectives d'Environnement Mondial (*The Global Environment Outlook Team*).

³ IGP : Institut de géophysique du Pérou (*The Geophysical Institute of Peru*).

De son côté, la résilience se concrétise au travers du niveau de revenu et de la facilité d'accès aux produits de première nécessité, les services publics et services sociaux sont également à considérer. La résilience fait aussi référence à l'ampleur des actifs présents sur un territoire. Enfin, la capacité d'adaptation et la stabilité sociétale terminent de caractériser cette notion.

Catégorie	Facteurs de caractérisation de la résilience	Base de données exploitable
Revenu et accès à l'alimentation	Revenu moyen par personne par jour	INEI ¹
	Dépense moyenne par personne et par jour	INEI
	Taux d'insécurité alimentaire	N/A
	Taux de qualité globale alimentaire	N/A
	Consommation moyenne alimentaire (kcal par personne et par jour)	N/A
Accès aux services de base	Proximité des services de santé	MINSa ²
	Niveau de qualité des services de santé	MINSa
	Niveau de qualité du système éducatif	MINEDU ³
	Taux d'insécurité	N/A
	Couverture et efficacité des transports publics	MTC ⁴
	Couverture et efficacité des réseaux d'eau, d'électricité et de téléphone	MTC
Services sociaux	Moyens engagés dans le cadre des services sociaux (ratio pour 1000 habitants)	MTPE ⁵
	Taux de qualité de l'aide apportée	MTPE
	Taux de la population active suivie dans le cadre de l'aide à l'emploi	MTPE
	Durée moyenne d'un accompagnement	MTPE
	Efficacité perçue des services sociaux	MTPE
Actifs	Surface moyenne des logements	INEI
	Taux d'équipement moyen (TV, voitures, etc.)	INEI
	L'Unité Bétail Tropical (UBT) équivalent à 250 kg	N/A
	Taux de propriétaires (vs locataires)	MINAG ⁶
Capacité d'adaptation	Nombre de sources de revenus par foyer (moyenne)	INEI
	Niveau d'études moyen du foyer	INEI
	Taux d'emploi moyen du foyer	INEI
	Ratio de consommation alimentaire (dépenses alimentaires/dép. totales)	INEI
Stabilité	Taux de chômage par foyer	INEI
	Evolution des revenus (%)	INEI
	Evolution des dépenses (%)	INEI
	Taux d'épargne moyen	INEI
	Reste à vivre moyen	INEI
	Stabilité du système éducatif	INEI

Table III-3 : Les facteurs de caractérisation de la résilience.

D'après Alinovi et al (2009).

¹ INEI: L'Institut National de la Statistique et de l'Informatique au Pérou (*The National Institute of Statistics and Informatics*).

² MINSa : Le Ministère Péruvien de la Santé (*The Peruvian Ministry of Health*).

³ MINEDU: Le Ministère Péruvien de l'Education (*The Peruvian Ministry of Education*).

⁴ MTC: Le Ministère Péruvien des Transports et Communications (*The Ministry of Transport and Communications of Peru*).

⁵ MTPE : Le Ministère Péruvien du Travail (*The Peruvian Ministry of Labor*).

⁶ MINAG: Le Ministère Péruvien de l'Agriculture (*The Peruvian Ministry of Agriculture*).

A l'évidence, tous ces facteurs ne sont pas indépendants et ne sont pas nécessairement aussi sensibles sur les conséquences potentielles de toutes les catastrophes. En pratique, le fait de s'intéresser à des crises de type inondation en Amérique du Sud ou de type cyclones en Asie du Sud-Est invitera à considérer tel ou tel facteur de façon privilégiée. La section suivante s'intéresse à cette question en proposant une méthode permettant de sélectionner les facteurs à prendre en compte pour une étude bien spécifique.

1.2.1.2. Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.

Considérant l'ensemble des facteurs que nous venons d'identifier, il est désormais clair que l'établissement d'un modèle de prévision d'impact d'une catastrophe est un système exogène (au contraire de l'estimation d'occurrence qui pouvait être considérée comme endogène). Pour autant, le nombre de facteurs est sans doute à ce stade beaucoup trop important pour être exploitable. En outre, l'interdépendance de ces facteurs n'est nullement garantie, pas plus que leur intérêt à décrire telle ou telle situation spécifique.

La question qui se pose alors est de savoir comment identifier et comprendre, dans le cadre de notre étude, les facteurs remarquables qui permettront d'établir un modèle de prévision des conséquences de catastrophes qui soit pertinent (Pang, 2011 ; Contreras et al. 2013). Pour ce faire, nous proposons d'utiliser des outils d'analyse de données. Les méthodes d'analyse de données permettent en effet une étude globale des individus et des variables les caractérisant en utilisant généralement des représentations graphiques. Dans le contexte de transition actuel où les données qui étaient en quantité limitée sont désormais fréquemment en profusion, mais à l'état brut, les objectifs de telles méthodes sont multiples : maîtriser la qualité de l'information, la traduire sous une forme exploitable, en extraire des connaissances, réaliser un diagnostic (Lauras, 2004).

Plusieurs méthodes classiques d'analyse de données sont à notre disposition. Ces méthodes peuvent être regroupées au sein de deux grandes familles (Lauras, 2004). D'abord, les méthodes de *statistique exploratoire* ou descriptive qui synthétisent et résument l'information contenue dans les données. Leur rôle est de mettre en évidence des propriétés de la population observée et de suggérer des hypothèses. On distinguera dans les statistiques descriptives :

- Les méthodes de classification (former des groupes d'individus) ;
- Les méthodes factorielles (réduire le nombre de caractéristiques) ;
 - ❖ Analyse en composantes principales (quantitatif) ;
 - ❖ Analyse des correspondances (qualitatif) ;
 - ❖ Analyse canonique (lien entre caractères).

Ensuite, les méthodes dites de *statistique inférentielle* ou explicative qui partent (à l'inverse d'un raisonnement déductif classique) de plusieurs réalisations d'un phénomène pour essayer de tirer des conclusions quant aux lois de probabilité qui le régissent. En d'autres termes, la statistique inférentielle étend les propriétés constatées sur un échantillon à la population tout entière, et confirme ou infirme les hypothèses formulées a priori. Plusieurs techniques sont associées à ces méthodes :

- Les techniques d'estimation recherchent les lois de comportement qui décrivent au mieux les mesures dans le cadre d'une incertitude supposée ;
- Les techniques de vérification d'hypothèses (tests) exploitent la propriété mathématique supposée d'une variable (loi de distribution de probabilité) pour éprouver un échantillon.

Dans nos travaux, nous cherchons à identifier quels sont les facteurs discriminants de façon à établir dans un second temps des modèles de corrélation adaptés à la situation étudiée. Notre étude se situe donc clairement dans le cadre d'une politique de statistique exploratoire et nécessite plus particulièrement l'utilisation de méthodes factorielles. L'art consiste alors à savoir maîtriser un rapport de forces entre un modèle de représentation – basé sur la recherche de corrélations linéaires entre paires de caractères – des données et les valeurs des données elles-mêmes. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sont les outils qui répondent à cette problématique. L'ACP traite le domaine quantitatif alors que l'AFC traite le domaine qualitatif. Dans notre étude, les données disponibles sont d'ordre exclusivement quantitatif. L'ACP semble donc être une approche satisfaisante pour notre problème, à l'instar de ce que les travaux de Bernanke et Boivin (2003), Boivin et Ng (2005, 2006) ou Bai et Ng (2006 : 2008) ont pu démontrer.

D'après (Saporta, 1990 : Escofier et Pagès, 1997 : Bouroche et Saporta, 2002 : Lauras, 2004), l'ACP a pour objet la description de données contenues dans un tableau individus-caractères numériques par une représentation approchée du nuage des individus dans un sous espace de caractères de dimension plus faible. L'objectif est de permettre, par des interprétations graphiques, de déterminer des groupes d'individus qui se distinguent des autres et des caractères discriminants. Il s'agit de la méthode de base de l'analyse de données (Saporta, 1990).

Considérons un exemple issu de (Bouroche et Saporta, 2002) avec seulement deux caractères x^1 et x^2 . Il est alors possible de représenter sur un plan l'ensemble des données. Chaque individu est alors représenté par un point de coordonnées x_i^1 et x_i^2 et la simple analyse de l'allure du graphique permet de déterminer l'intensité de la liaison (cf. figure suivante). Trois options sont alors possibles : absence de liaison entre les individus, forte liaison (corrélation) entre les individus, mise en évidence de groupes homogènes disposant de caractéristiques semblables relativement à x^1 et x^2 .



Figure III-5 : Liaisons possibles entre individus.

D'après Bouroche et Saporta (2002).

Avec trois caractères, il est encore envisageable de conduire l'étude de façon visuelle au moyen de la géométrie dans l'espace. Au-delà, il n'est plus possible de faire une représentation graphique des liaisons. Le positionnement d'individus relativement à une étude portant sur n caractères formera en effet un nuage dans un espace à n dimensions, puisqu'il y aura n coordonnées. Pour pouvoir tout de même disposer d'une représentation graphique, il faut projeter les points qui représentent les individus sur un plan (cf. figure suivante). Une telle démarche conduit mécaniquement à une représentation déformée de la configuration exacte (toutes les distances projetées ne pouvant, par construction, être égales aux distances originelles).

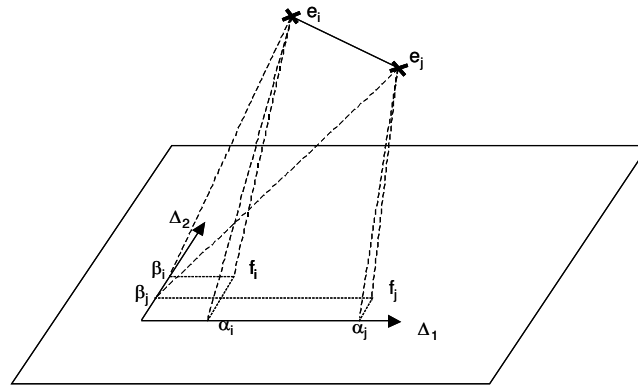


Figure III-6 : Exemple de projection des individus sur un plan.

Source : Lauras (2014).

L'objectif est bien sûr de déterminer le plan de projection pour lequel les distances seront les mieux conservées. Puisque l'opération de projection raccourcit (ou maintient dans le meilleur des cas) les distances entre les points ($d(f_i, f_j) \leq d(e_i, e_j)$), on prendra comme critère la maximisation de la moyenne des carrés des distances entre les projections. Le plan sera alors défini par deux droites Δ_1 et Δ_2 perpendiculaires telles que : $d^2(f_i, f_j) = d^2(\alpha_i, \alpha_j) + d^2(\beta_i, \beta_j)$ où les α_i et les β_i sont les projections des individus e_i (et donc des f_i) sur Δ_1 et Δ_2 . La méthode consiste alors à chercher tout d'abord Δ_1 en identifiant la valeur maximale des $d^2(\alpha_i, \alpha_j)$ puis Δ_2 perpendiculaire à Δ_1 , qui rend maximale les $d^2(\beta_i, \beta_j)$. En prolongeant la méthode au-delà du plan, on trouvera les $\Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \dots, \Delta_p$ perpendiculaires entre elles. Les Δ_i sont appelées les axes principaux du nuage.

En projetant les individus qui avaient pour coordonnées initiales $(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ sur les axes principaux, on obtient de nouvelles coordonnées $(c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^n)$. On construit ainsi de nouveaux caractères appelés composantes principales (c^1, c^2, \dots, c^n) . Chaque composante se définit alors comme la liste des coordonnées des n individus sur l'axe Δ_k et est une composante linéaire des caractères initiaux : $c^k = u_1^k x^1 + u_2^k x^2 + \dots + u_p^k x^n$ où les u_i^k forment le k -ième facteur principal u^k . Le principe mathématique consiste donc à effectuer des changements de repère, dans l'espace des caractères, et à calculer le nombre minimal d'axes qui conservent les distances initiales entre les points, après projection.

Finalement, l'ACP est une technique permettant de diagnostiquer le degré de dépendance linéaire entre les caractères d'un système complexe (ce qui est notre objectif, ndlr). L'ACP est donc une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des

individus et des caractères. Cette réduction n'est possible que si les caractères initiaux ne sont pas indépendants et ont donc des coefficients de corrélation non nuls. L'ACP est une méthode factorielle, car la réduction du nombre des caractères ne se fait pas par une sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des « facteurs ». Les nouveaux caractères sont des combinaisons linéaires des anciens. Ce qui fait la spécificité de l'ACP, c'est qu'elle traite exclusivement de caractères numériques jouant tous le même rôle.

L'utilisation d'une méthode ACP sur les données numériques associées aux facteurs issus de l'étape 1 de notre méthodologie permettra d'obtenir une liste de facteurs discriminants pour le cas étudié, tant pour caractériser la vulnérabilité que pour caractériser la résilience. Evidemment, s'agissant de statistiques exploratoires, le résultat sera directement dépendant des données de base collectées et analysées. Plus les données seront nombreuses, plus le résultat obtenu à l'issue de cette deuxième étape sera pertinent.

1.2.1.3. Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.

L'objet de cette troisième étape est désormais de constituer concrètement le modèle de prévision correspondant au cas étudié. Compte tenu de l'hypothèse retenue selon laquelle les occurrences futures sont similaires aux occurrences passées, cette étape cherchera dans un premier temps à expliquer au travers des facteurs discriminants issus de l'étape 2, la corrélation existante entre les catastrophes passées et leurs conséquences. L'approche employée consiste alors en une simple analyse de régression à variables multiples basée sur la formule suivante :

$$\text{Impact constaté d'une catastrophe} = f(v_1, v_2, \dots, v_m; r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (2)$$

Dans laquelle :

$\{V_1, \dots, V_m\}$ sont les facteurs discriminants (identifiés lors de l'étape 2) caractérisant la vulnérabilité.

$\{R_1, \dots, R_n\}$ sont les facteurs discriminants (identifiés lors de l'étape 2) caractérisant la résilience.

Sans essayer de procéder aux démonstrations, il convient de s'arrêter un instant sur les mécanismes de fonctionnement de la corrélation linéaire multiple. L'objectif est de déterminer la valeur d'une variable numérique aléatoire, dite « expliquée », par les valeurs de plusieurs autres variables, dites « explicatives », numériques ou binaires. Dans notre cas, la variable expliquée est le nombre de victimes impacté par la catastrophe étudiée alors que les variables explicatives sont celles issues de l'étape 2 de notre démarche. La mise en œuvre d'une telle approche suppose donc qu'un modèle décrit parfaitement la réalité et l'on cherche à s'en approcher :

$$y_i = a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_kx_{ki} + b + \varepsilon_i \quad (3)$$

Néanmoins, il faut rester réaliste et le modèle ne sera pas parfait. Pour chaque observation ou presque, il existera une différence entre la valeur mesurée dans la réalité et la valeur calculée par le modèle. C'est ce que l'on nomme les résidus. (<http://jybaudot.fr/>). Saporta (2006) et Baudot (<http://jybaudot.fr/>) décrivent le mécanisme de régression linéaire multiple comme suit : les

paramètres de la régression, estimateurs des vrais paramètres inconnus, sont des variables aléatoires dont on peut estimer les variances. Soit X la matrice rectangulaire des valeurs des k variables explicatives pour les n observations, plus une colonne de 1 (pour la constante). Y est la matrice colonne des valeurs de la variable à expliquer. Soit X' la transposée de X . La matrice des coefficients est égale à $(X'X)^{-1}X'Y$. Cette matrice fournit les espérances des vrais paramètres. Mais il faut également connaître leurs dispersions pour juger de leur plus ou moins bonne « qualité ». On calcule alors l'erreur quadratique moyenne σ^2 (somme des carrés des résidus divisée par $n - k - 1$) qui permet d'établir leur matrice des variances-covariances (matrice diagonale avec les variances sur la diagonale et les covariances en élément extra-diagonal) : $\sigma^2(X'X)^{-1}$. Une fois l'analyse des événements passés réalisée, il est possible d'établir un modèle de prévision capable de prévoir l'impact (en nombre de victimes) de la survenue probable à la période t de telle ou telle catastrophe. Ce modèle de prévision est représenté dans le cadre de la formule suivante :

$$\text{Impact attendu d'une catastrophe future} = f_{t=1,\dots,T}(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{mxn}) \quad (4)$$

Dans laquelle :

X_k est une variable indépendante composée de $\{m \times n\}$ valeurs enregistrées dans une période donnée t , à partir d'une base de données qui comprend T périodes totales.

L'ACP a été appliquée comme outil complémentaire aux outils de prévision économétriques. (Pang, 2011) estime que la prévision fondée sur l'utilisation d'ACP améliore la précision de la prédiction. Il donne comme exemple les cas de prévision macroéconomiques. D'autres cas de prévisions similaires ont été fait par (Bernanke et Boivin, 2003 ; Bovin et Ng, 2005 : 2006 ; Bai et Ng, 2006 : 2008). Dans l'humanitaire notamment, les travaux applicatifs de (Frazier et al., 2013) et les travaux connexes de (Alsahehri et al., 2013) sont remarquables, sur la caractérisation des territoires et de la population face aux crises.

1.2.1.4. Etape 4 : Validation du modèle de prévision.

La qualité globale d'une régression linéaire multiple peut être évaluée par le coefficient de détermination (appelé aussi coefficient de corrélation) ou par l'Akaike Information Criterion (souvent jugé plus fiable). Ces tests sont généralement utilisés lorsque les données ne sont pas suffisamment nombreuses pour disposer d'un échantillon d'apprentissage et d'un échantillon de test.

Dans notre cas, les catastrophes récurrentes sont par définition nombreuses et il est donc possible de disposer d'un échantillon suffisamment vaste pour tester la qualité globale du modèle obtenu. En d'autres termes, il s'agit d'essayer de reconstruire certains événements passés à partir du modèle obtenu et de mesurer l'écart entre le résultat théorique et la réalité des faits. Ce critère est généralement appelé ratio de déviation ou résidu. Nous avons considéré les bornes suivantes pour évaluer la qualité des modèles de prévision obtenus :

Si $75 \% < Ratio < 100 \%$ alors le modèle est considéré comme « bon ».

Si $50 \% < Ratio < 75 \%$ alors le modèle est considéré comme « douteux ».

Si $Ratio < 50 \%$ alors le modèle est considéré comme « mauvais ».

1.2.2. Application numérique

Pour faciliter la compréhension de l'outil, nous présentons une application numérique simple. On s'intéresse à la prévision de la demande d'aide humanitaire en réponse à des catastrophes de type tremblement de terre ou inondation, dans une région d'un pays donnée. Ce cas exemple est inspiré de données issues de la région de Cusco au Pérou.

Étape 1 : Identification des facteurs d'influence.

Parmi tous les facteurs mentionnés précédemment, nous ne retenons que les 12 facteurs présentés dans le tableau ci-dessous. Ces 12 facteurs sont ceux qui, au dire des experts locaux de la gestion de crise, sont a priori les plus significatifs eu égard aux types de catastrophes que le territoire concerné a l'habitude de subir.

Variables	Facteurs					
Vulnérabilité	Densité de population (quantité ; en millions)	Indice de Développement Humain, IDH (ratio)	Taux de raccordement aux réseaux d'eau potable (%)	Taux de raccordement aux réseaux électriques (%)	Taux d'habitation précaire (%)	Espérance de vie à la naissance (/ an et pour mille enfants)
Résilience	Taux d'alphabétisation (%)	Taux de scolarisation dans le secondaire (%)	Taux de réussite éducatif aux examens du secondaire (%)	Revenu moyen par personne par jour (<i>Nuevos Soles</i>)	Taux d'insécurité (nb de plaintes / mille habitants)	Taux de qualité de l'aide apportée (montant des aides sociales / millions d'habitants)

Table III-4 : Facteurs caractérisant l'état de vulnérabilité et de résilience.

Le tableau ci-dessous fournit les données numériques associées pour les années 1993, 2000 et 2007.

Facteurs	Années		
	1993	2000	2007
Vulnérabilité			
Densité de population (mille)	983,7	1067,3	1063,5
Indice de Développement Humain, IDH	0,53	0,58	0,60
Taux de raccordement à l'eau potable	49 %	61 %	72 %
Taux de raccordement aux réseaux électriques	45 %	65 %	73 %
Taux d'habitation précaire (ou vulnérabilité de la construction)	69 %	68 %	59 %
Espérance de vie à la naissance	66,8	67,9	72,3
Résilience			
Taux d'alphabétisation	78 %	81 %	88 %
Niveau de qualité du système éducatif (secondary registration)	65 %	75 %	86 %
Niveau de qualité du système éducatif (réussite éducatif)	74 %	79 %	87 %
Revenu moyen ¹	87,9	307,27	320,8
Taux d'insécurité ¹ (ou nombre de crimes et délits)	7,88	8,20	4,50
Taux de qualité de l'aide apportée ¹	0,0	0,0	0,4

¹ Voir l'explication dans le tableau précédent.

Table III-5 : Données pour le cas exemple. Cas d'Ancash au Pérou.

Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.

Conformément à la méthodologie présentée, nous réalisons une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur ces données. Le logiciel « Le Sphinx Plus²-V5 » a été utilisé pour ce faire. Les résultats sont présentés ci-dessous :

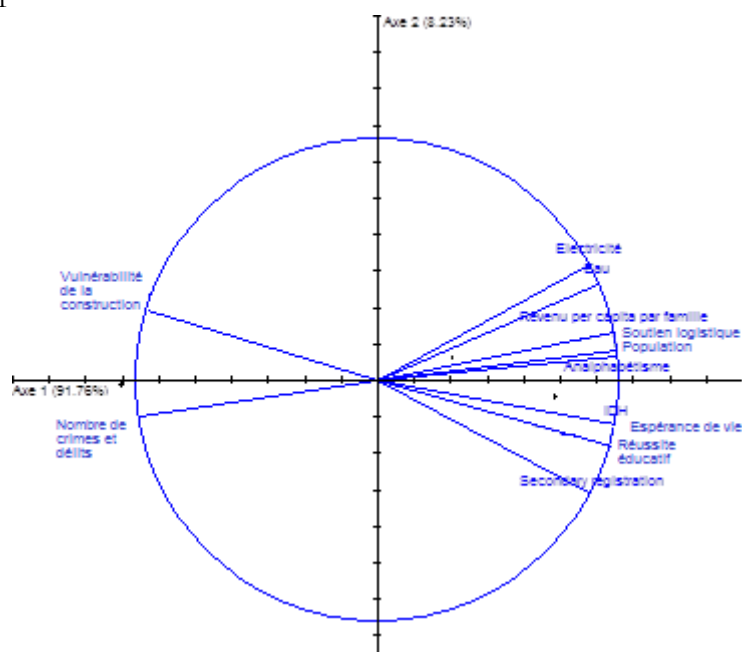


Figure III-7 : Carte d'Analyse en Composantes Principales sur le cas exemple.

Cette carte donne les positions des 12 critères et les coordonnées des 3 observations (1993, 2000 et 2007). Les deux axes représentés expliquent 99,99 % de la variance, ce qui est très satisfaisant. Chaque observation est représentée par un point.

Facteurs	Population	IDH	(EV)	(AN)	(SR)	(RE)	(RP)	(NCD)	(SL)	Eau	(EL)	(VDC)
Population	1,00											
IDH	0,96	1,00										
Esperance de vie (EV)	0,93	0,93	1,00									
Analphabétisme (AN)	1,00	0,98	0,96	1,00								
Secondary registration (SR)	0,82	0,95	0,98	0,88	1,00							
Réussite éducatif (RE)	0,93	1,00	1,00	0,96	0,98	1,00						
Revenu per capita (RP)	0,99	0,92	0,88	0,98	0,76	0,88	1,00					
Nbre. crimes et délits (NCD)	-1,00	-0,94	-0,91	-0,99	-0,80	-0,91	-1,00	1,00				
Soutien logistique (SL)	1,00	0,95	0,92	0,99	0,82	0,92	1,00	-1,00	1,00			
Eau	0,95	0,83	0,77	0,92	0,62	0,77	0,98	-0,97	0,96	1,00		
Electricité (EL)	0,92	0,77	0,71	0,88	0,54	0,71	0,96	-0,94	0,93	1,00	1,00	
Vulnérabilité de const. (VDC)	-0,92	-0,99	-1,00	-0,95	-0,98	-1,00	-0,87	0,90	-0,91	-0,76	-0,69	1,00

Table III-6 : Corrélations entre les facteurs de la vulnérabilité et résilience.

On observe alors qu'il y a une forte corrélation ($R > 0,85$) entre la plupart des facteurs étudiés, à l'exception de ceux relatifs à la couverture des réseaux d'électricité (EL) et d'eau (E). Ces deux derniers facteurs sont par ailleurs très fortement corrélés dans cet exemple. Il est alors possible de conclure que, pour cet exemple, les facteurs IDH et E sont les facteurs discriminants, qui expliquent à eux seuls le niveau de résilience et de vulnérabilité de ce territoire.

Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.

Pour déterminer l'équation liant le nombre de victimes avec ces trois facteurs, nous avons utilisé les valeurs de quatre années : 1993, 1995, 2000 et 2007 telles que présentées dans le tableau ci-après. Arrêtons-nous un instant sur les données présentes dans ce tableau. On y retrouve évidemment les années et les trois facteurs jugés discriminants dans l'étape précédente vis-à-vis

de l'impact potentiel d'une catastrophe. Mais on y trouve également le « nombre de victimes enregistrées pour une catastrophe ». Cette dernière information présente les valeurs y de l'équation que nous cherchons à obtenir. Il faut bien comprendre ici que nous cherchons à disposer du nombre de victimes associé à une et une seule catastrophe pour pouvoir établir notre modèle de prévisions. Hors dans certains cas, cette information ne sera pas disponible sous cette forme (vision agrégée de l'ensemble des victimes de l'ensemble des catastrophes pour l'année par exemple). Ainsi, un travail préalable à cette étape devra consister à permettre l'obtention de cette information. Dans les cas les plus difficiles, il sera toujours possible d'intégrer à l'équation de régression à la fois les critères de vulnérabilité et résilience et le nombre d'occurrences associées (par exemple 10 tremblements de terre pour l'année considérée représentant un total de 3200 victimes). Une autre alternative consistera à considérer non pas le nombre victimes enregistrées pour 1 catastrophe mais le nombre total de victimes pour une année donnée. Il faut aussi noter que dans certains cas, les bases de données peuvent mélanger catastrophes récurrentes et catastrophes exceptionnelles. Dans ce cas il faudra être en mesure de faire le distinguo entre les catastrophes récurrentes et exceptionnelles. Ici encore si l'accès à ces données spécifiques n'est pas possible, une solution dégradée consistera à appliquer la méthode à l'ensemble des données et à assouplir les critères de validation du modèle.

Revenons maintenant à la mise en œuvre pratique de l'analyse de régression. Elle a été ici réalisée avec le logiciel Excel sur la base des données suivantes :

Année	IDH	NCD	VDC	Nombre des victimes
1993	0,53	7 884	69,0 %	1 440
1995	0,56	6 207	67,3 %	830
2000	0,58	8 200	68,0 %	2 406
2007	0,60	4 503	59,0 %	491
2012	0,62	6 862	55,0 %	2 566 (calculé) / 2 193 (constaté)

Table III-7 : Données et résultats obtenus sur le cas exemple Ancash.

Sur la base des données de 1993, 1995, 2000 et 2007, nous obtenons l'équation de régression multiple (MV) suivante :

$$Victimes = + 16826,995 * IDH + 0,686 * NCD - 2581,551 * VCS - 11168,97$$

Les deux variables expliquent 100,0 % de la variance des « Victimes ». Le coefficient de corrélation multiple : $R = 1,00$. Il est donc exceptionnellement bon (ce qui est logique compte tenu de l'extrême simplicité de ce cas). Afin d'évaluer la pertinence de notre modèle, nous avons

cherché à établir les prévisions de victimes¹ pour l'année 2012. Le calcul donne un nombre de victimes potentiel de 2 566 pour une catastrophe dans cette région qui aurait pu survenir en 2012.

Etape 4: Validation du modèle de prévision.

Pour vérifier l'ordre de grandeur de cette prévision, nous comparons simplement le résultat du calcul obtenu sur l'année 2012 avec la réalité des faits enregistrés sur cette année. Dans cet exemple, nous avons constaté que la survenue des catastrophes dans cette région avait conduit à 2 193 victimes. Le ratio de déviation par rapport aux 2 566 victimes calculés est alors de l'ordre de 17 %, ce qui semble correct et permet dans ce cas de valider le modèle avec les résultats du reste de régions du pays.

¹ Notons que l'impact va s'exprimer au travers de la quantité de victimes et non pas au travers de la quantité de personnes affectées :

- « victime » est définie par l'INDECI (2006) comme une personne touchée partiellement ou totalement par une situation d'urgence ou de catastrophe, qui a subi des blessures, des dommages sur sa santé ou sur sa propriété. Dans ce dernier cas, elle est généralement sans logement de façon permanente ou temporaire et nécessite de l'aide humanitaire et un abri temporaire.
- « affecté » qualifie une personne, un animal, un territoire ou des infrastructures qui ont souffert des perturbations de leur environnement sous l'effet d'un phénomène d'origine humaine ou naturelle. Une personne affectée peut nécessiter un soutien immédiat pour éliminer ou réduire les causes de la perturbation et poursuivre son activité normale.

Par exemple dans l'application numérique qui nous intéresse ici, il est possible de remarquer des différences significatives entre « victimes » et « affectés ». A cause des chutes de grêle sur la région de Cusco en 2009 notamment, le nombre de personnes affectés s'est élevé à 84 089 (affectés en raison d'impact sur les cultures, la santé, économie, etc.), alors que seules 19 personnes ont été concernées par une intervention humanitaire cette année-là. Précisions que les personnes « affectées » seront normalement prises en charge par les pouvoirs publics concernés alors que les « victimes », elles, seront prises en charge directement par l'aide humanitaire.

2. Méthode de conception de scénarios humanitaires réalistes

Dans les deux premiers chapitres de ce manuscrit, nous avons expliqué l'intérêt, les enjeux et l'engouement existant depuis une vingtaine d'années dans le domaine de la recherche scientifique vis-à-vis de la gestion de crises, notamment humanitaires. Pour autant, force est de constater qu'il existe un écart très significatif entre les propositions scientifiques faites et leur mise en œuvre concrète sur le terrain. Les professionnels de la gestion des secours sont souvent très réservés sur la pertinence des solutions proposées par les scientifiques, notamment lorsqu'il s'agit d'approches quantitatives. Une des causes majeures de ce manque de confiance résulte du fait que les chercheurs utilisent pour concevoir et valider leurs propositions, des scénarios jugés trop simplistes ou pas suffisamment réalistes. C'est par exemple le cas de ces nombreux modèles de conception de réseaux logistiques qui émettent implicitement dans leurs scénarios que l'ensemble des routes et infrastructures demeure utilisable, même après la survenue d'une catastrophe. Hors l'expérience montre combien cette hypothèse est rarement recevable en situation de crise.

Un des enjeux actuels est donc de pouvoir bénéficier de scénarios plus fidèles à la réalité et plus à même de garantir une bonne représentativité des problèmes du terrain. Cette section s'intéresse à ce sujet en proposant d'abord un rapide état de l'art sur la notion de scénario en général, et dans le monde de la gestion de crise en particulier. Puis nous proposerons une méthode structurée d'élaboration de scénarios réalistes.

2.1. Revue de littérature.

2.1.1. Incertitude et scénario.

Comes et al. (2014) indiquent que plusieurs approches existent dans la littérature vis-à-vis de la notion de scénario. On parle de scénario pour :

- Définir « une vision consistante et personnelle de ce que pourrait être le futur ». Il ne s'agit pas d'une prévision mais d'un état possible pour l'avenir. (Porter, 1985) ;
- Analyser et structurer un ensemble d'idées dans l'optique de supporter une prise de décision stratégique. (Moschandreas et Karuchit, 2002) ;
- Combiner un ensemble de paramètres. (Groves et Lempert, 2007) ;
- Examiner ce qui pourrait arriver si une stratégie donnée était mise en œuvre. (Van Notten et al. 2003).

Dans la suite, nous ne retiendrons que la première acception.

Frigg et Hartmann (2012) indiquent que la notion de scénario telle qu'utilisée dans un cadre scientifique revêt deux approches fondamentalement différentes. Un scénario peut d'abord être une représentation d'un sous-ensemble du monde (système cible). C'est ce qu'il est convenu d'appeler « modèle de données ». Un scénario peut également représenter une théorie ou un système d'aide à la décision capable d'interpréter des lois et/ou axiomes concernés. Ces scénarios sont généralement appelés « modèles de théorie ».

Les propositions relatives à des modèles de théorie sont nombreuses (voir Chapitre IV pour plus de détail sur ces sujets). La nature des travaux développe autant des approches qualitatives (études de cas, sociologie, anthropologie, etc.) que quantitatives (recherche opérationnelle, simulation de flux, etc.) (Altay et Green, 2006 : Galindo et Batta, 2013). Notre étude s'intéresse plus spécifiquement aux propositions quantitatives du type modèle analytique. Le pan de littérature concerné montre que de nombreux outils, méthodes et techniques ont été proposés ces dernières années. Bien qu'historiquement plutôt orientés sur des approches déterministes (Charles, 2010), les modèles qui sont aujourd'hui développés privilégient des approches stochastiques, robustes ou floues (Peres et al. 2012 : Galindo et Batta, 2013) afin de mieux appréhender l'incertitude inhérente à ce domaine d'application. Ces approches nécessitent toutes de disposer d'un modèle de données pour pouvoir fonctionner.

Malheureusement (Peres et al. 2012 : Galindo et Batta, 2013) démontrent que la quasi-totalité des contributions existantes ont été développées sur la base de modèles de données irréalistes et souvent très simplistes. Aussi, bien que théoriquement très pertinent, la plupart de ces contributions sont jugées inconsistantes par les professionnels du secteur et restent bien souvent lettre morte.

Pour éviter ce problème, l'idée consiste à établir un modèle de données qui soit plus robuste. Un modèle de données est une version corrigée, rectifiée, régentée, voire idéalisée ou simplifiée des données brutes que l'on est susceptible de collecter (Frigg et Hartmann, 2012). Evidemment, le problème prend une tout autre dimension dans le cadre humanitaire tant l'accès aux données est délicate et tant l'incertitude sur la donnée elle-même est élevée. Concernant l'incertitude, Bronner (1997) en distingue deux acceptions complémentaires :

- L'incertitude de résultats qui caractérise le manque de connaissance sur la survenue d'un événement futur sur lequel il est impossible d'avoir une influence. Le cas le plus typique est la survenue potentielle d'une catastrophe naturelle (tremblement de terre par exemple). Il est possible de savoir qu'une région sera touchée sans pour autant savoir exactement quand ou avec quelle ampleur ;
- L'incertitude d'état qui caractérise le risque qu'une partie du système considéré risque d'être impactée par la survenue d'un événement perturbateur - naturel ou anthropique (PAHO, 2000a) et donc de ne plus être en capacité de fonctionner de façon nominale. Le cas le plus typique ici concerne l'indisponibilité de telle ou telle infrastructure suite à la survenue d'une catastrophe naturelle.

Dans le cas des crises de nature humanitaire, notamment les crises d'origine naturelle, les deux niveaux d'incertitude sont évidemment à considérer (Huang et Shi, 2002). En effet, au-delà de l'incertitude de résultat portant sur l'occurrence d'une catastrophe et de son impact humain (voir section 1 du présent chapitre pour plus d'information), toutes les situations de gestion de crise comporte une incertitude d'état lié à la disponibilité des ressources et des infrastructures utiles aux opérations de secours. Comme le démontre (Long et Wood, 1995) ou (Cassidy, 2003), la gestion de crise s'effectue généralement dans le cadre d'une perturbation majeure des ressources et infrastructures disponibles : routes coupées, entrepôt inopérant, alimentation électrique

coupée, etc. En conséquence, la notion de scénario attachée au cas des opérations humanitaires se doit de couvrir ces deux types d'incertitude pour être pertinent.

2.1.2. Méthodes de définition de scénarios

Comes et al. (2014) rappellent qu'il existe trois grandes familles de méthodes de conception de scénarios : analytiques, discursives ou formelles.

2.1.2.1. Méthodes analytiques

Il existe différentes catégories d'approches analytiques utilisant la simulation, les statistiques, etc. Parmi toutes ces catégories, les techniques qui adressent les cas stochastiques sont probablement les plus complètes et les plus pertinentes à l'égard à notre sujet d'étude. Nous allons nous intéresser un instant à ces approches. Pour bien comprendre la suite, nous considérons la formulation générique suivante d'un problème de conception en environnement stochastique :

$$\min_{x \in \mathcal{C}} \int_{\Xi} f(\xi, x) P(d\xi) \quad (4)$$

Dans laquelle les paramètres aléatoires de dimension n sont définies sur un espace de probabilité (Ξ, \mathcal{F}, P) , où \mathcal{F} est le σ -champ de Borel sur Ξ et P représente la mesure de probabilité représentant l'incertitude du problème, et $\mathcal{C} \subseteq \mathbb{R}^n$ est l'ensemble (déterministe) des décisions possibles. Dans la pratique, l'ensemble des résultats possibles correspondant à P est souvent approchée par un nombre fini ξ_k ($k = 1, \dots, K$) de scénarios de probabilités w^k , ce qui permet une approximation de l'intégrale exprimée dans l'équation (4) par une somme telle que définie ci-après :

$$\min_{x \in \mathcal{C}} \int_{\Xi} f(\xi, x) P(d\xi) \approx \min_{x \in \mathcal{C}} \sum_{k=1}^K w^k f(\xi^k, x) \quad (5)$$

Le problème de génération de scénarios dans un environnement stochastique vise donc à alimenter correctement l'ensemble des paramètres de l'équation (5). Dupačová et al. (2000), Kaut et Wallace (2003), Legrain (2011) et Chen et al. (2012) proposent des états de l'art sur les différentes méthodes existantes pour résoudre ce problème. Un premier ensemble de méthodes est basé sur le tirage des scénarios selon une loi de distribution (Legrain, 2011) :

- La plus connue est sans doute la méthode dite de Monte Carlo (MC). Cette méthode considère un ensemble de nombres pseudo-aléatoires (vecteurs) comme scénarios et un ensemble de poids uniformes $w_1 = \dots = w_K = 1/K$;
- Une autre méthode, développée dans (Pennanen et Koivu, 2002), est celle dite de Quasi Monte Carlo (QMC), dans laquelle des scénarios de poids uniformes sont générés en utilisant des séquences telles que la séquence de Faure, la séquence de Sobol ou la séquence de Niederreiter ;
- Certains auteurs comme Loretan (1997) se servent d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour réduire les paramètres décrivant la corrélation entre les états du processus. Puis ils utilisent ces vecteurs pour générer des arbres de scénarios corrélés pour ce processus stochastique ;

- D'autres auteurs comme Cario et Nelson (1997) utilisent les mêmes méthodes, mais au lieu de corrélérer les scénarios avec les composantes principales, ils prennent en compte directement la distribution marginale ou la matrice de corrélation ;
- Un nombre important d'auteurs développe des techniques comparables aux précédentes. Il se trouve qu'il est très souvent difficile d'obtenir les distributions marginales. Il est beaucoup plus facile d'utiliser les moments de la distribution. Vale et Maurelli (1983) se servent des quatre premiers moments pour générer des arbres simulant le score de tests psychologiques. Smith (1993), Høyland et al. (2003) ou plus récemment Mehrotra et Papp (2013) illustrent d'autres méthodes et exemples utilisant les moments pour choisir les scénarios ;
- Dupačová et al. (2000) enfin montrent comment générer des arbres de scénarios à partir d'un ensemble de scénarios, des chemins donnés.

Un deuxième point sensible de la génération de scénarios est la réduction de la taille des ensembles de scénarios, des arbres de scénarios. Cet aspect est aussi très important, car la majorité des modèles d'optimisation stochastique ne peut être résolue qu'avec un nombre restreint de scénarios (Legrain, 2011). En effet, le temps de résolution sera beaucoup trop grand si la taille n'est pas correctement dimensionnée. Selon (Consigli et al. 2000 : Heitsch et Römis, 2007), le principe consiste généralement à générer aléatoirement un grand nombre de scénarios et à sélectionner un « sous-ensemble limitée de scénarios satisfaisants » parmi eux. Pour ce faire, différentes heuristiques et techniques d'exploration de données existent. Dempster et Thompson (1999) utilisent par exemple une heuristique basée sur la valeur dite de l'information parfaite. Dupačová et al. (2003) de leur côté utilisent une approche dite de discrétisation optimale. Pflug (2001) propose quant à lui de choisir les scénarios en minimisant une fonction erreur. Enfin, Casey et Sen (2005) développent une analyse de sensibilité sur une approche de type programmation linéaire pour guider la génération de scénarios.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la mesure de la qualité de chacune de ces méthodes. Ainsi (King et Wets, 1991 : Donohue, 1996) ont étudié l'épi-convergence de la méthode de MC alors que (Pennanen et Koivu, 2005 : Pennanen, 2005) se sont intéressés à celle de la méthode de QMC. Kaut et Wallace (2003) quant à eux ont comparé différentes méthodes deux à deux. Loin d'aboutir à des conclusions absolues, ces études montrent que selon les cas et les données manipulées, telle ou telle approche est plus ou moins satisfaisante.

2.1.2.2. Méthodes discursives.

Les approches discursives, au contraire des précédentes, sont adaptées aux situations fortement incertaines, pour lesquelles peu d'information formalisée et structurée est disponible (Comes et al. 2014). Les approches discursives s'appuient en grande partie sur la connaissance d'experts. Comes et al. (2014) expliquent que dans ces écoles de pensée, les scénarios sont typiquement créés à partir de rien en appliquant des techniques créatives. Ceci peut être un problème quand le temps disponible est court ou quand la disponibilité des experts est limitée. De plus, le manque de formalisation limite la comparabilité des scénarios et rend complexe et coûteuse les mises à jour.

2.1.2.3. Méthodes formelles.

Les méthodes formelles se placent à l'intersection des deux familles précédentes. Le principe consiste à établir pour chaque variable considérée, une liste de valeurs et à générer des scénarios de façon aléatoire par combinaison entre toutes ces valeurs. Des méthodes formelles telles que La Prospective (Godet, 2000) ou une combinaison de la méthode Delphi et de la méthode d'analyse d'impact croisé (Bañuls et Turrof, 2011) sont des exemples de méthode formelle. Le risque inhérent à ce genre d'approche est sans nul doute la génération de scénarios inconsistants qui viendraient « noyer » l'utilisateur (Comes et al. 2014). Des traitements ex-post peuvent alors être mis en œuvre pour limiter cet écueil.

2.1.3. Définition de scénarios dans le monde humanitaire.

Si des méthodes analytiques existent bel et bien pour définir des scénarios, elles ne doivent pas être considérées comme des outils miracles. Leur qualité dépend avant toute chose, de la pertinence et de l'exhaustivité des données initiales qui sont considérées. Aussi, dans un contexte humanitaire où les données sont généralement peu abondantes et/ou peu fiables (Charles, 2010), la mise en œuvre de telles méthodes peut apparaître comme relativement délicate. De fait, une grande majorité des travaux existants s'est appuyée sur des méthodes discursives ou des approches analytiques limitées en termes de périmètre et de combinatoire.

En outre, force est de constater que très peu de travaux adressant la question humanitaire proposent aujourd'hui des approches basées sur la génération d'ensemble de scénarios réalistes. La plupart du temps, les sujets s'appuient sur des (Charles, 2010 : Peres et al. 2012 : Galindo et Batta, 2013) :

- Cas d'étude (souvent unique) de crises passées, souvent établies avec une approche essentiellement qualitative ;
- Jeux de tests numériques simplistes (limités en taille, incluant de nombreuses hypothèses simplificatrices, etc.) permettant de valider les principes généraux et les éventuels mécanismes de calcul de la proposition mais en aucun cas de les confronter à la complexité du terrain.

2.1.4. Bilan.

L'approche par scénarios pose deux problèmes (Snyder, 2006). Le premier est de définir les scénarios et d'assigner des probabilités fiables. Le second est d'identifier un nombre suffisamment restreint de scénarios pour des raisons de calcul. Nous retenons de cet état de l'art que la génération de scénarios s'exécute selon deux temps complémentaires :

- La génération selon une loi de distribution d'un large ensemble de scénarios répondant aux caractéristiques recherchées dans le cadre du problème étudiée (dans notre cas, les deux types d'incertitudes évoquées dans la section précédente devront être adressés) ;
- La sélection d'un sous-ensemble représentatif et couvrant parmi tous ces scénarios afin de répondre à la question tout en maintenant des temps de calcul raisonnable.

Par ailleurs, la plupart des travaux de recherche actuels (en logistique humanitaire, et plus généralement en aide à la décision pour l'humanitaire) s'appuient sur des scénarios qualitatifs

(approche discursive), simplistes ou irréalistes (approches analytiques ou formelles). Les modèles et solutions qui en résultent sont donc soumis aux doutes des utilisateurs finaux qui de facto, ne les utilisent pas. Pour permettre de développer des solutions plus concrètes et plus robustes, il convient de développer des scénarios qui soient plus représentatifs de la réalité des faits d'une part, et qui soient compatibles avec les exigences des modèles numériques d'autre part.

2.2. Contribution n°2 : méthode d'élaboration de scénarios réalistes.

2.2.1. Principes généraux.

En cohérence avec l'état de l'art que nous venons de développer, nous proposons ici de structurer une démarche de génération de scénarios dédiée à l'alimentation de modèles d'aide à la décision de nature quantitative tels que programmation linéaire. En particulier notre approche concerne les modèles de nature stochastique capables d'appréhender véritablement la dimension incertaine du secteur humanitaire. Le cadre de la proposition se limite ici encore aux catastrophes de type récurrent.

Un des enjeux de notre approche est de pouvoir adresser la question de l'incertitude selon ses deux dimensions complémentaires « résultat » et « état ». Dans notre contexte, il est possible de considérer que l'incertitude de résultat s'intéresse à la notion de victimes engendrées par la catastrophe (et donc de matériel nécessaire aux secours), alors que l'incertitude d'état s'intéresse à la notion de capacité résiduelle du réseau logistique susceptible d'être employé pour répondre à la crise. Un autre enjeu concerne la capacité à générer un ensemble complet et réaliste de scénarios. Cet ensemble doit à la fois être couvrant vis-à-vis des problématiques étudiées, et suffisamment restreints en taille pour être traité par des approches analytiques. Une question centrale porte notamment sur la probabilité d'occurrence que l'on doit associer à tel ou tel scénario pour rester représentatif et crédible au regard des professionnels du secteur.

De ces éléments, nous avons tiré une démarche articulée autour de 5 étapes majeures (voir figure suivante) :

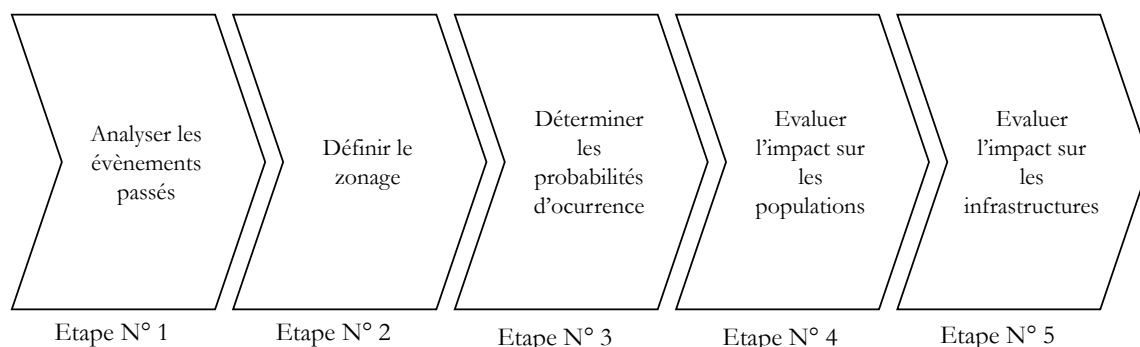


Figure III-8 : Méthodologie pour définir des scénarios réalistes.

2.2.1.1. Etape n°1 : Analyser les événements passés

Cette étape consiste à analyser les caractéristiques des catastrophes (localisation et intensité) afin d'en comprendre les principaux mécanismes.

L'objectif de cette étape est d'objectiver la situation étudiée. Il s'agit de collecter un maximum d'informations tangibles (i.e. quantitatives et fiables) sur les événements passés :

- Date ;
- Localisation ;
- Typologie de phénomène enregistré ;
- Intensité et durée du phénomène.

Compte tenu du caractère récurrent des catastrophes étudiées, on prendra garde à considérer un intervalle de temps suffisamment grand pour être représentatif. Cet intervalle comprend généralement un minimum de dix ans, étant entendu que plus l'intervalle sera grand, plus la génération de scénarios qui en résultera sera pertinente. On pourra utiliser des bases de données propres au pays concerné ou bien exploiter des bases plus généralistes telles que OFDA/ CRED (EM-DAT, <http://www.emdat.be/database>).

2.2.1.2. Etape n°2 : Définir le zonage

L'objectif de cette étape consiste à proposer un découpage géographique du territoire concerné qui soit cohérent avec les phénomènes naturels constatés. Pour ce faire, il faut utiliser les informations sur les caractéristiques sociodémographiques, géomorphologiques ou climatologiques des territoires. Un pays régulièrement soumis à des tremblements de terre par exemple, le sera avec des fréquences d'apparition différentes selon la localisation géographique considérée. Les futurs scénarios à définir devront donc être organisés selon ce découpage.

Au-delà de ce zonage, cette étape doit permettre de caractériser les lois de propagation des phénomènes naturels qui existent entre les zones identifiées. Une éruption volcanique par exemple (voir la figure suivante) aura tendance à se propager dans des directions bien déterminées correspondant aux caractéristiques géologiques de l'environnement. L'analyse des données collectées lors de l'étape 1 doit permettre de relever les liens de cause à effet qui existe entre les différentes zones. Ces liens sont plus ou moins complexes selon les phénomènes naturels. Dans les cas les plus simples, une matrice de corrélation pourra être construite. Sur les cas plus complexes, des fonctions spécifiques seront à établir avec les experts métiers concernés.

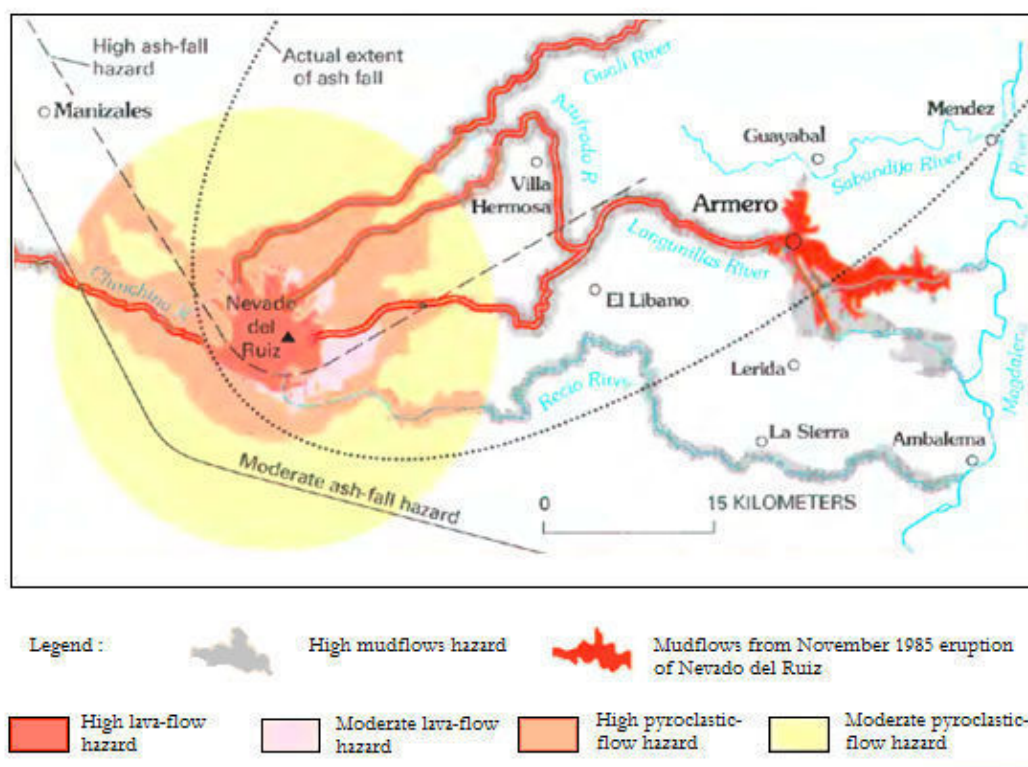


Figure III-9 : Exemple de propagation d'une éruption volcanique.

Source : <http://thewatchers.adorraeli.com/2011/09/13/unrest-at-nevado-del-ruiz-volcano-in-colombia/>.

2.2.1.3. Etape n°3 : Déterminer les probabilités d'occurrence

L'objectif de cette étape est de construire une liste exhaustive de scénarios plausibles, et d'associer pour chacun d'entre eux une probabilité de survenu. Cette étape s'appuie sur l'hypothèse qu'il y a une valeur quasi-périodique de l'occurrence de la catastrophe par périodes fixes de temps. Cette hypothèse n'est valide que parce que les crises concernées sont de nature récurrente (au sens de ce qui a été défini au Chapitre II).

En pratique, nous utilisons les informations collectées lors de l'étape 1. Pour déterminer où l'épicentre de la catastrophe sera localisé, nous étudions (sur un intervalle de temps donné) le nombre d'occurrences qu'une région a enregistré. Puis nous affectons à chaque région du territoire étudié un poids relatif (pourcentage) dans la survenue du phénomène.

Le phénomène déclencheur d'une catastrophe étant défini à la fois par son occurrence et par son intensité, il convient donc d'ajouter une information caractérisant l'intensité moyenne de la survenue de catastrophe dans telle ou telle région. Pour garantir une bonne représentativité des scénarios résultant, les cas extrêmes doivent être retirés du panel étudié. Ainsi, les événements passés d'intensité trop faible ou trop forte ne seront pas considérés dans le calcul de la moyenne. Ces limites sont à définir par des experts des phénomènes concernés. On notera également que des approches un peu plus riches peuvent être envisagées à ce stade comme par exemple le fait

d'associer à chaque scénario une loi triangulaire comprenant les valeurs d'intensité moyenne, minimale et maximale. Ce cas de figure pourra par exemple être très adapté si les modèles utilisés par la suite sont des modèles de type flou. Pour permettre une utilisation efficace des scénarios, les valeurs manipulées à ce niveau pourront être traitées par intervalle. Ainsi, pour les tremblements de terre par exemple, les experts découpent généralement les événements en 5 classes distinctes : magnitude en dessous de 5,5 : entre 5,5 et 6,0 : entre 6,0 et 7,0 : entre 7,0 et 8,0 : et au-dessus de 8,0.

Au final, le nombre de scénarios généré pour une même région peut varier de 0 à n, n étant égal au nombre d'intervalles d'intensité retenu. C'est cette approche combinée d'un découpage géographique raisonné (étape 2) et d'une définition de scénarios par intervalle (étape 3) qui permettra de limiter le nombre de scénarios au strict nécessaire tout en garantissant la représentativité et l'exhaustivité. Nous suggérons ici de vérifier que l'ensemble des scénarios représente un minimum 75 % des données enregistrées lors de l'étape 1.

2.2.1.4. Etape n°4 : Evaluer l'impact sur les populations

Cette étape se concentre sur l'incertitude de résultat et met en œuvre la contribution n°1 sur le « modèle de prévision de la demande pour des catastrophes récurrentes » présentée plutôt dans ce chapitre. De cette étape, résulte une estimation de la quantité de victimes (et donc des produits et services nécessaires pour leur venir en aide) associées à chaque scénario. L'estimation est faite pour un événement donné et une région donnée.

Etape n°5 : Evaluer l'impact sur les infrastructures

Cette dernière étape adresse le sujet de l'incertitude d'état en proposant une estimation des conséquences sur les infrastructures liées à la survenue d'une catastrophe. Pour ce faire cette étape exécute trois temps successifs.

D'abord, il s'agit de collecter l'ensemble des informations relatives aux infrastructures disponibles. Cette information doit comprendre à minima le relevé des capacités des liaisons transport existantes entre chaque région. De la même façon, un recensement des capacités d'entreposage disponibles dans chaque région pourra être réalisé.

Ensuite, il faut déterminer comment un événement arrivant dans une région donnée se répercute sur les autres régions. On peut par exemple, utiliser un arbre de propagation décrivant les liens de cause à effet entre plusieurs régions. Dans la figure suivante, on considère un tremblement de terre de magnitude 7,5 dans la région R1 qui aura pour conséquence de diminuer les capacités d'entreposage de 60 % dans la région R2 si elle est en zone sensible (ZS, i.e. à forte propagation des ondes) ou 40 % si elle est en zone non sensible (ZNS, i.e. à faible propagation des ondes). En suivant le même raisonnement, la diminution sera de 5 % ou 15 % dans la région R3 selon que la région sera ZNS ou ZS. Un raisonnement similaire pourra être conduit sur les capacités routières.

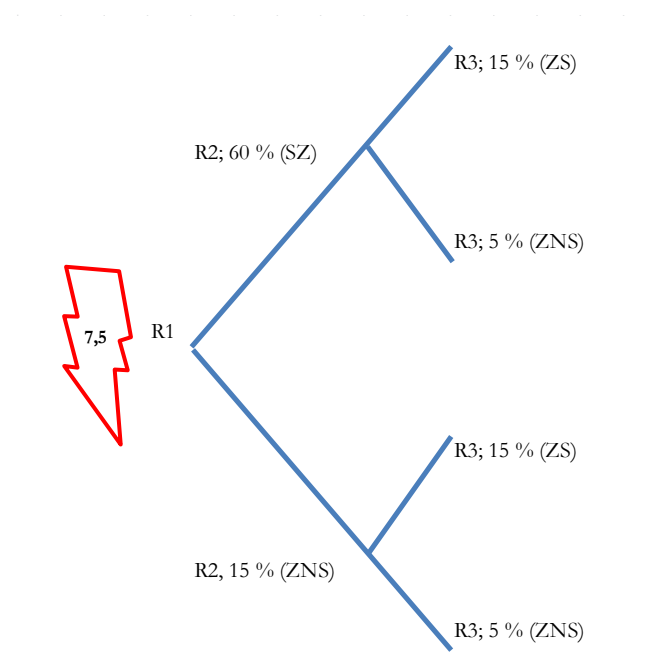


Figure III-10 : Exemple d'arbre de propagation.

L'instanciation des différents scénarios issus des étapes précédentes sur cet arbre de propagation constitue l'ultime temps de cette cinquième étape.

On remarquera que l'arbre de propagation inclut toutes les options, y compris celles qui n'ont pas de réalité physique. Dans cet exemple, une région est forcément sensible ou non sensible mais ne peut-être les deux à la fois. Pour autant, l'approche consiste à envisager l'ensemble des branches de façon à ne pas construire les scénarios « manuellement », ce qui pourrait potentiellement être très fastidieux. A l'évidence, l'exploitation des scénarios résultant fera que telle ou telle branche ne sera jamais parcouru et n'aura donc pas d'incidence sur le résultat final. Néanmoins, d'autres approches auraient pu être envisagées ici pour ne construire dès cette étape que les branches ayant un sens physique établi.

A l'issue de cette étape, un ensemble complet de scénarios est disponible présentant des garanties en termes de :

- Réalisme : basée sur une analyse factuelle des phénomènes passés ;
- Couverture : estimation des impacts humains et matériels ;
- Complétude : génération d'un ensemble de scénarios couvrant au moins les trois-quarts des phénomènes attendus.

Chapitre IV.

MODELE D'AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION DE CHAINES LOGISTIQUES ROBUSTES

A ce stade du travail, nous disposons de moyens permettant de générer des scénarios réalistes de demande. Pour autant, l'objectif final de notre projet de recherche est de soutenir la démarche de conception de Chaînes Logistiques Humanitaires (CLH) qui présente des garanties en termes de résilience et d'efficience. Nous allons donc développer dans ce chapitre le cœur de notre contribution en nous intéressant à la définition d'un modèle d'aide à la décision pour la conception de CLH robustes. Cette présentation sera précédée d'un état de l'art relatif au sujet de la conception de chaînes logistiques d'une part, et des approches existantes vis-à-vis des problèmes dits de localisation dans les chaînes logistiques traditionnelles et humanitaires d'autre part.

1. Conception des chaînes logistiques traditionnelles

1.1. Problématique et enjeux

Que ce soit dans le domaine de la production des biens ou des services, la performance d'un système productif est liée en grande partie à la manière dont il a été conçu. La conception d'une chaîne logistique concerne à la fois la structure physique de la chaîne et le système de pilotage de ses différentes activités (approvisionnement, production, stockage, distribution, etc.) et traite tout ou partie des localisations des centres de distribution, des choix des fournisseurs, des affectations des clients aux centres localisés et des centres aux fournisseurs choisis.

Dans les entreprises industrielles, les chaînes logistiques sont composées de cinq types d'entités (Klibi et al, 2010b) :

- Les fournisseurs externes ;
- Les usines de fabrication des produits intermédiaires et / ou finis ;
- Les centres de distribution et /ou commerciaux ;
- Les zones de demande ;
- Les activités de transport.

Pour Chopra et Meindl (2010), les décisions de conception des chaînes logistiques portent sur :

- Le rôle que doit jouer chaque acteur : quel processus va s'effectuer dans chaque installation ?
- L'emplacement de l'établissement : où les installations doivent-elles être situées ?
- La répartition des capacités : quelle capacité doit être allouée à chaque installation ?
- Le marché et l'offre : quels marchés doivent être desservi par chaque établissement ?
Quels fournisseurs doivent approvisionner chacune des installations ?

La conception physique implique de prendre en premier lieu des décisions stratégiques sur le nombre, l'emplacement, la capacité des installations de production-distribution de l'entreprise ou de l'ensemble de sociétés qui collaborent, afin de fournir des biens à un ensemble de clients. La localisation des diverses unités va influencer très fortement les performances logistiques de l'entreprise et son accès au marché. Comme il est complexe et coûteux sur les plans économique et humain d'ouvrir et de fermer une unité, les décisions portant sur la localisation relèvent du niveau stratégique. A ce niveau le plus large, le problème de localisation consiste à positionner les diverses unités composant l'entreprise (sites de production, entrepôts, points de ventes, agences, etc.) au travers des territoires couverts.

En second lieu, la conception de la chaîne implique de prendre des décisions relatives à la sélection des fournisseurs, sous-traitants, prestataires logistiques (3PL et 4PL). La conception peut aussi porter sur la détermination de l'offre produit à mettre sur le marché. Les décisions de conception du réseau ont un impact significatif sur les performances, car elles déterminent la configuration de la chaîne logistique et elles définissent les contraintes de pilotage de la chaîne, que ce soit pour diminuer le coût ou pour accroître la réactivité.

Plus fondamentalement, comment peut-on être assuré que la chaîne logistique obtenue permettra une adéquation performante pour le produit/service requis ? Pour Fisher (1997) et beaucoup d'autres, la demande influe sur la conception de la chaîne logistique. Il propose d'abord de déterminer si les produits sont fonctionnels ou innovants :

- Les produits fonctionnels répondent à des besoins fondamentaux, qui ne changent pas beaucoup au fil du temps. Ils sont stables, avec une demande prévisible et un long cycle de vie ;
- Les produits innovants ont des marges de profit plus élevées, leur demande est imprévisible, leur cycle de vie est court.

Ensuite, il faut déterminer si l'organisation de la chaîne logistique utilisée est physiquement efficace ou réactive sur le marché. Cela permettra de déterminer la nature des produits et les priorités de la chaîne. Fisher (1997) propose d'utiliser une matrice 2 x 2 (voir la figure suivante) qui croise le type de produits (fonctionnels / innovants) et le type de chaîne (efficace / réactif).

En utilisant la matrice, il est possible de déterminer si le processus utilisé pour l'approvisionnement des produits est adapté au type produit/service, à savoir :

- Une chaîne logistique efficace pour les produits fonctionnels ;
- Une chaîne logistique réactive pour des produits innovants.

Chaîne logistique	efficace	Alignement	Inadéquation
	réactif	Inadéquation	Alignement
		Produits fonctionnels	Produits innovants

Figure IV-1 : Matrice de correspondance entre une supply chain et ses produits.

Source : Fisher (1997).

1.2. Le facteur « risque » au centre du débat

Une préoccupation majeure des entreprises contemporaines lors de la conception de leur chaîne logistique est la prise en compte des risques. Nous considérons ici la définition normée du risque : un risque est caractérisé comme le produit probabilité \times impact ou plus précisément comme « l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs » (*International Organization for Standardization, ISO 31000 Guide 73 : 2009, définition 1.1*). Dans le contexte particulier des chaînes logistiques, le *risque* peut être défini comme la rencontre d'un événement – décision ou aléa –

avec une situation, caractérisée par une incidence sur la performance de la chaîne (Marquès, 2010 : Lamothe, 2010).

Les chaînes logistiques sont menacées par un large spectre d'événements qui sont la source de déficiences majeures sur la performance du réseau. Martha et Vratimos (2002), Semchi-Levi et al. (2002), Helferich et Cook (2002), Christopher et Lee (2004), Chopra et Sodhi (2004) et Sheffi (2005) en présentent plusieurs cas. Les catégories de risque pour les chaînes logistiques ont été identifiées par Christopher et Peck (2004), Chopra et Sodhi (2004), Kleindorfer et Saad (2005), Wagner et Bode (2006) et Tang (2006). Grossi et Kunreuther (2005) et Banks (2006) ont étudié la gravité de ces événements, ainsi que le comportement dans l'espace et le temps de l'état de crise généré. Cependant plusieurs auteurs soulignent que très peu de modèles existant considèrent les aspects incertains dans l'étude des chaînes (Goetschalckx *et al.*, 2002 : Meixell et Gargeya, 2005 : Benyoucef, 2008).

Parmi les multiples causes de perturbation, on peut mentionner : la pénurie d'approvisionnement, les grèves, les problèmes de transport, les erreurs humaines, l'évolution des goûts de la clientèle, les défaillances technologiques, les activités malveillantes, les difficultés financières voire la faillite de partenaires, les catastrophes naturelles ou d'origine humaine, etc. (Handfield et McCormack, 2008 : Deleris et Erhun, 2011). Plusieurs exemples illustrent cette réalité et démontrent que la notion de risque dans les chaînes logistiques n'est pas qu'une affaire de spécialistes humanitaires, loin s'en faut !

- *Approvisionnement insuffisants* : en Mars 2000, un incendie dans une usine de semi-conducteurs de Philips Electronics situé à Los Alamos (Nouveau-Mexique, Etats-Unis) a stoppé la production des puces pour téléphones mobiles assemblés par Nokia et Ericsson. Nokia s'est montré réactif. Mais, pour Ericsson, ceci a retardé la production. La production perdue a été estimée à 220 millions de dollars pendant le deuxième trimestre de l'année 2000 (Latour, 2001) et a probablement précipité le déclin de cette marque. On trouve un autre cas à l'usine de production d'automobiles de MG Rover, en Longbridge (le Royaume-Uni). Un manque de pièces en Avril 2005 a forcé l'usine à suspendre ses opérations et probablement ici aussi accéléré l'effondrement de la société (Rice, 2005) :
- *Grèves* : en 1997, UPS (United Parcel Service) contrôlait 80 % des toutes les livraisons de paquets aux Etats-Unis. La grève des camionneurs d'UPS qui a duré 15 jours l'a affecté sévèrement et a paralysé la logistique de nombreux fabricants américains (Treece, 1997) ;
- *Changements des goûts de la clientèle* : en 2001, la forte baisse des ventes due à l'effondrement des entreprises de vente sur internet et la détérioration de l'économie a provoqué l'accumulation de matières premières et de produits finis sur les sites de production. Ceci a finalement conduit à Cisco à déprécier ses stocks de 2,25 milliards de dollars (Barrett, 2001) ;
- *Bugs informatiques* : une faille dans le logiciel de planification de la demande de Nike au début de l'été 2000, a provoqué un réapprovisionnement insuffisant pour la production des Air Jordans. Nike a annoncé 100 millions de dollars de ventes perdues (Koch, 2004). La gestion des chaînes logistiques repose sur l'exploitation de logiciels sophistiqués pour gérer la production, les fournisseurs, les stocks, etc. Ces logiciels sont vulnérables aux pannes des ordinateurs et aux « bugs » logiciels. Une enquête auprès de 300 entreprises

sélectionnées au hasard (aux États-Unis), a relevé qu'un tiers environ de ces entreprises a eu des incidents moyens ou majeurs causés par des virus en 2003, avec un coût moyen de récupération près de 100 000 dollars par incident (Lemos, 2004) ;

- *Défaillances technologiques* : le 14 Août 2003, une panne du réseau électrique a affecté la région nord-est des États-Unis en raison de défaillances d'équipements (Kleindorfer et Saad, 2005). Cela a privé d'énergie environ 50 millions de personnes dans l'Ontario au Canada. Pendant une trentaine de minutes, les services vitaux (hôpitaux, etc.) n'ont été opérationnels qu'à 20 % de leur capacité. Le transport ferroviaire pour voyageurs a été interrompu, et on a enregistré des perturbations majeures dans le transport aérien international (Olson, 2011) ;
- *Partenaires en difficulté ou en faillite financière* : l'effondrement financier de l'UPF Thompson a forcé Land Rover à suspendre presque totalement la production de son modèle *Discovery*. UPF Thompson était le seul fournisseur de châssis pour ce modèle. Le contrat entre les deux sociétés représentait 65 % de l'activité de UPF Thompson (Macalister 2002).

Au-delà de ces exemples, les chaînes logistiques traditionnelles sont bien entendu également vulnérables aux perturbations causées par des catastrophes naturelles ou humaines. Divers cas ont été étudiés par Rice et Caniato (2003), Christopher et Peck (2004), Sheffi (2005), Wagner et Neshat (2010).

Pour faire face aux risques, les chaînes logistiques tendent à mettre en pratique les concepts fondamentaux du *management des risques* vu comme l'ensemble des « activités coordonnées dans le but de diriger et piloter une organisation vis-à-vis du risque » (*International Organization for Standardization*, 2009). Le processus de management des risques comprend alors classiquement 5 étapes (Zsidisin et Ritchie, 2008 : Marquès, 2010) :

- L'établissement du contexte : permet de définir l'ensemble des paramètres externes ou internes au système qu'il faut prendre en compte ainsi que les méthodes qui seront utilisées pour l'identification et l'évaluation ;
- L'identification des risques : processus de recherche, de reconnaissance et description des sources de risques, leur(s) zone(s) d'impact, les événements potentiels, leurs causes et leurs conséquences possibles ;
- L'analyse des risques : processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque ;
- L'évaluation des risques : permet de comparer les risques et de sélectionner ceux qui devront être traités ;
- Le traitement des risques : consiste dans le choix d'une solution pour traiter le risque et son implémentation (évitement, modification, suppression, partage).

Dès lors la gestion des risques dans les chaînes logistiques s'intéresse principalement aux activités préventives qui permettront à une organisation ou un réseau d'organisations « d'encaisser » les perturbations et de réagir « correctement » aux aléas qui pourront se présenter. Ainsi, (Brindley, 2004) indique que si la mission naturelle du *SCM* est de créer de la valeur au travers de la chaîne, celle du *Supply Chain Risk Management (SCRM)* consiste à préserver cette création de valeur en identifiant les risques potentiels et en mettant en place des plans de contingence susceptibles d'y faire face. Tang (2006) propose une analyse approfondie de ce que propose la littérature autour

de ce concept. Il définit entre autre le *SCRM* comme un mécanisme de coordination et de collaboration entre les acteurs d'une chaîne logistique permettant de gérer les risques de l'ensemble de cette chaîne afin d'en assurer la profitabilité et la continuité (au sens de la continuité des activités en cas de perturbation). D'après (Tang, 2006 : Handfield et McCormack, 2008 : Zsidisin et Ritchie, 2008), le *SCRM* porte sur deux grandes familles de risques. Il y a d'abord les risques dits « opérationnels ». Il s'agit des risques inhérents à l'exécution de l'activité et qui peuvent prendre par exemple la forme de machines qui tombent en panne ou de ressources humaines malades. Puis, il y a les risques liés aux « perturbations » externes. Un fournisseur qui dépose le bilan, une crise financière, un incendie dans une usine sont de cette nature. Si les méthodes de *SCRM* sont relativement bien établies concernant la gestion des risques « opérationnels » (Brindley, 2005 : Handfield et McCormack, 2008 : Zsidisin et Ritchie, 2008), la gestion de risques liés aux « perturbations » reste à structurer et à organiser (Tang, 2006).

Au final, meilleure soit la démarche de *SCRM*, il subsistera toujours des cas de figure où l'occurrence du risque se concrétisera (en particulier pour les risques liés aux perturbations) et où l'impact associé sera significatif pour l'organisation concernée. Dans les cas les plus critiques, cette situation sera qualifiée de situation de *crise* (Lauras, 2013).

1.3. Les approches de modélisation : déterministes, stochastiques ou robustes

Dans notre étude, nous allons chercher à développer un modèle mathématique susceptible de répondre à la problématique que nous nous sommes fixés. La caractéristique commune que partagent toutes les modélisations mathématiques, c'est de représenter une partie de la réalité et d'utiliser des variables et paramètres pour y aboutir. Cette représentation a pour but de permettre de prendre des décisions, de mettre en œuvre ou de comprendre les implications de la prise de décision sur la réalité étudiée. Les modèles de programmation mathématique représentent la réalité à travers la combinaison de variables et de paramètres sous la forme de contraintes et/ou de fonctions objectifs. En général, les contraintes doivent être respectées et la fonction objectif permet de faire la différence entre une solution et une autre solution potentiellement meilleure.

Un modèle est dit *déterministe* lorsque toutes les données sont supposées connues sans incertitude. Un modèle déterministe se comporte toujours de la même façon et donne le même résultat pour un ensemble de valeurs identiques des paramètres d'entrée.

Dans un modèle *stochastique* certaines variables d'état sont représentées par des distributions de probabilité. Par conséquent le modèle est capable de prendre en compte le hasard ou l'incertitude dans ses résultats. Anjorin (2010) affirme que les problèmes d'optimisation stochastique sont typiquement dynamiques. Les algorithmes pour résoudre ces problèmes sont classés comme NP-difficile¹ (Dyer et Stougie, 2006).

Pour Birge et Louveaux (1997), Kall et Wallace (1994) une formulation standard d'un programme d'optimisation stochastique linéaire à deux étapes peut s'écrire de la manière suivante :

¹ P et NP (Polynomiale et Non-déterministe Polynomiale) problèmes se réfèrent au sujet de leur complexité de calcul à résoudre. Ainsi, un problème est appelé NP si sa solution peut être devinée et vérifiée en un temps polynomial et qu'aucune règle particulière n'est suivie pour faire l'estimation (non déterministe). Ainsi, un problème est NP-difficile s'il y a un algorithme pour sa solution qui peut être modifié pour résoudre n'importe quel problème NP (EB, 2014).

$$\min \quad c^t x + E_{w \in \Omega} [Q(x, w)], \quad s. t. x \in X \quad (6)$$

$$avec; Q(x, w) = \min f(\omega)^t y,$$

$$s. t. \quad D(w)y \geq h(w) + T(w)x, \quad y \in Y \quad (7)$$

Où $X \subseteq R^{n_1}$ et $Y \subseteq R^{n_2}$ sont un ensemble polyédrique. ω est une variable aléatoire sur un espace de probabilité (Ω, \mathcal{F}, P) avec $\Omega \subseteq R^k$, $f: \Omega \rightarrow R^{n_2}$, $h: \Omega \rightarrow R^{m_2}$, $D: \Omega \rightarrow R^{m_2 \times n_2}$, $T: \Omega \rightarrow R^{m_2 \times n_1}$. Le problème (6) avec les variables x constitue la première étape qui doit être décidée avant la réalisation des paramètres incertains $\omega \in \Omega$. Le problème (7) avec des variables y , constitue la seconde étape.

Pour capturer la notion de risque dans la programmation stochastique, Mulvey et al. (1995) ont proposé la modification suivante (8) de la fonction objective de (6):

$$\min \quad c^t x + E_{\omega \in \Omega} [Q(x, w)] + \lambda f(w, y) \quad (8)$$

Où f est une mesure de la variabilité, telle que la variance des coûts de deuxième étape, et λ est un scalaire non négatif qui représente la tolérance au risque du modelleur. Les grandes valeurs de λ donnent des solutions qui permettent de réduire la variance tandis que les petites valeurs de λ réduisent les coûts attendus.

L'objectif du modèle stochastique est souvent d'obtenir une solution optimale qui minimise ou maximise en moyenne la valeur de l'objectif. Pour Bertsimas et Thiele (2006), la programmation stochastique s'est imposée comme un outil puissant de modélisation quand une description probabiliste aléatoire est disponible. Cependant, dans de nombreuses applications de la vie réelle, le décideur ne possède pas cette information. Quand il s'agit d'évaluer la demande client pour un produit innovant, le cycle de vie d'un produit, etc., la quantité d'informations disponibles est souvent réduite et l'estimation des probabilités devient un défi insurmontable. Dans ce cas, ce sont des modèles dits *robustes* qui seront développés. L'idée est de faire en sorte que les solutions proposées soient le moins possibles influencées par le scénario effectif. La robustesse est définie par Klibi et al. (2010b) comme une mesure de la flexibilité utile maintenue par une décision permettant de garder des marges de manœuvre pour les choix futurs. Elle se base sur une optimisation de la solution à partir de scénarios préétablis mais n'en privilégie aucun afin que la solution soit performante quel que soit le scénario (Baud-Lavigne, 2012).

En synthèse, nous retiendrons que la programmation stochastique suppose que la fonction de probabilité des paramètres aléatoires est connue alors que dans les modèles robustes, les paramètres aléatoires, les fonctions de probabilité ne sont pas forcément connues. Pour les approches robustes, les paramètres incertains peuvent être donnés par un ensemble de scénarios discrets ou une plage continue. Le but de ce type de méthode est d'obtenir une solution optimale, qui est insensible à la quasi-totalité des valeurs des paramètres incertains.

2. Les problèmes de localisation

2.1. Présentation

La détermination des emplacements géographiques des diverses unités est appelée problème de localisation ou *location problem*. Dans tous les problèmes de localisation, la question de fond est de localiser un nombre limité d'unités afin d'approvisionner ou de desservir au mieux l'aire géographique concernée. Le premier problème de location applicable à l'industrie est le problème de Weber (1929). Ce problème consiste à placer dans un plan le point qui minimise la somme pondérée des distances à un ensemble de points donnés. L'application industrielle de ce problème consiste à localiser un entrepôt permettant de minimiser les coûts de des produits circulant entre cet entrepôt et un ensemble de clients (le coût transport étant proportionnel à la distance et au volume ou poids transporté). Par la suite les travaux de Hakimi (1964) ont étendu le problème au cas de plusieurs entrepôts dans le cas discret (la localisation des entrepôts et des clients est sur sommets d'un graphe réseau) donnant le problème dit *p-median*.

Si en plus de la localisation des sites, on cherche à déterminer les clients desservis par les unités implantées (l'allocation client), on parle de *location-allocation problem*. Le problème séminal de location allocation est dû à Kuehn et Hamburger (1963). L'objectif est de minimiser le coût de construction, de gestion, de transport et de distribution. Ce modèle fondamental est dit de localisation simple (*simple location*). Un très grand nombre d'extensions de ce problème ont été traitées dans la littérature. La très grande variété des modèles tient principalement aux hypothèses retenues :

- Les sites : nombre fixé de sites à retenir, capacité maximale d'un site ;
- Les relations entre les unités et les clients : client approvisionné par un seul ou plusieurs sites ;
- La typologie des coûts : linéaire, concave, convexe ;
- Les objectifs à atteindre : on peut très succinctement envisager les problèmes de localisation selon deux grandes problématiques :
 - ❖ Dans une problématique de service, l'objectif est de satisfaire, au moindre coût, tout ou partie de la demande (exemple : localisation d'entrepôts commerciaux ou humanitaires, d'hôpitaux) ;
 - ❖ Dans une problématique commerciale (répondre de la manière la plus profitable à la demande), l'objectif consiste à maximiser la fréquentation ou le chiffre d'affaires potentiel (exemple : localisation d'agences bancaires ou de magasins).

Notons que ces problèmes peuvent se rencontrer aussi bien dans l'industrie (dépôts, usines), dans les services publics (écoles, services d'intervention), que dans la conception des réseaux de communication (téléphonie mobile).

On trouve dans la littérature diverses classes de problèmes qui sont des extensions du problème de localisation simple :

- Lorsqu'un site ne peut approvisionner que les clients situés dans un certain rayon, on a alors un problème dit de *covering facility location* ;

- Les problèmes de *location routing* ajoute la gestion de la flotte de véhicules chargée des transports entre les entrepôts et les clients ;
- Dans les problèmes dits *warehousing location*, on prend en compte les usines qui alimentent les entrepôts ;
- D'autres classes de problèmes considèrent le choix des fournisseurs en plus de location des sites lors de la conception des réseaux de distribution (*location and supplier selection*) ;
- Enfin certains problèmes abordent la conception d'une chaîne logistique dans son ensemble (*supply chain network design*).

Tous ces problèmes de localisation peuvent se rencontrer dans un contexte déterministe, stochastique, robuste et même flou.

2.2. Etat de l'art des problèmes de localisation

Les problèmes de localisation au sens large (*location, facility location, warehousing location et location routing problem*) ont donné et donnent encore lieu à de nombreuses publications. On peut trouver plus de 3400 articles sur la localisation publiés avant 2007 sur le site *Hale T. Trevor Hale's location science references* - <http://gator.uhd.edu/~halet/>.

Un certain nombre de *surveys* récents sur différents groupes de problèmes de localisation ont été publiés depuis une quinzaine d'années. Sans être totalement exhaustif, on peut citer :

- ReVelle et Eiselt (2005), ReVelle et al. (2008) ou Daskin (2008) pour le problème général de localisation ;
- Farahani et al (2010) pour le problème de *covering facility location* ;
- Prodhon et Prins (2014) ou Michael Drexler (2013) pour le *location-routing problem* ;
- Jain et al. (2009) pour le *supplier selection problem*.

Dans leurs travaux de thèses, Tanonkou (2007) et Baud-Lavigne (2012) proposent également d'excellents états de l'art des modèles de conception de chaîne logistique et notamment des problèmes de localisation. Dans ce travail de recherche, nous voulons localiser les sites où seront implantés les entrepôts, fixer la capacité de ces entrepôts et déterminer comment les secours seront acheminés aux bénéficiaires. Le problème traité ici est fondamentalement un problème de location/allocation. La spécificité de notre approche tient principalement au fait que nous nous basons sur un ensemble de scénarios probabilisés et que d'un scénario à l'autre, les demandes et les infrastructures logistiques sont différentes. Pour un scénario donné, le contexte est déterministe. Pour l'ensemble des scénarios, il ne l'est plus !

Dans le modèle classique de Kuehn et Hamburger (*simple location*), les hypothèses retenues sont les suivantes :

- On doit approvisionner un ensemble de m clients ;
- On a recensé n sites potentiels où implanter un entrepôt (ou une usine) ;
- Chaque client sera rattaché à un seul dépôt ;
- A priori tout client peut être rattaché à n'importe quel dépôt ;
- Si le site s est retenu, il y a un coût fixe d'installation f_s ;
- Le coût de revient d'un article sur le site s est une constante p_s ;

- Les coûts de transport sont proportionnels aux quantités transportées et à la distance à parcourir.

Le problème se modélise sous la forme d'un programme linéaire à variables 0-1. Les variables de décision sont :

X_{sc} : quantité livrée à partir du site s au client c

$Y_s = 1$ si le site s est retenu, 0 sinon

Le programme correspondant est :

$$\min \sum_s f_s Y_s + \sum_s \sum_c (p_s + t_{sc}) X_{sc} \quad (9)$$

Soumis à :

$$\sum_s X_{sc} = D_c \text{ Le client } c \text{ reçoit ce qu'il demande}$$

$$\sum_c X_{sc} \leq M Y_s \text{ Détermination de } Y_s$$

Ce problème et ses extensions se modélisent comme un programme linéaire mixte à variables binaires (MILP). Ces problèmes sont NP-complets. A l'heure actuelle, les logiciels de programmation linéaire du marché (Cplex, Lingo, etc.) sont capables de résoudre ce type de problèmes avec plusieurs dizaines de variables binaires dans un temps raisonnable. Pour des problèmes de plus grande taille, de nombreuses méthodes ont été développées. Les problèmes de location/allocation ont été traditionnellement développés avec des modèles déterministes bien connus (Bagher et Yousefli 2011) tels que la théorie des graphes (Hakimi, 1964), les algorithmes de recherche arborescente (Kuenne et Soland, 1972), les méthodes exactes *branch-and-bound*, la relaxation lagrangienne ou la simulation (Murray et Church, 1996). Les métaheuristiques ont également été utilisées, comme la recherche tabou ou *tabu search* (Ohlemüller, 1997), le recuit simulé ou *simulated annealing*, la méthode de descente aléatoire proposée par Ernst et Krishnamoorthy (1999), l'algorithme amélioré avec la recherche de voisinage proposé par Brimberg et al. (2000) ou l'algorithme génétique de Gong et al. (1997).

Une grande majorité des publications sur les problèmes de *location/allocation* est déterministe et seuls quelques papiers proposent des approches stochastiques ou flous (Peres et al., 2012). Comme nous l'avons déjà dit, les méthodes habituelles pour faire face à des demandes incertaines sont basées sur l'optimisation stochastique ou robuste (Klibi et al., 2010b : Bagher et Yousefli, 2011 : Klibi et al., 2012b). L'optimisation stochastique utilise les probabilités d'occurrence et l'optimisation robuste utilise différents scénarios allant du plus optimiste au pire des cas. Les modèles d'optimisation stochastique cherchent le résultat optimal en moyenne. Selon (Shapiro et al., 2009) cela se justifie lorsque la loi des grands nombres peut être invoquée et que l'on s'intéresse à la performance à long terme, indépendamment des fluctuations d'une réalisation à l'autre. Dans notre cas, l'impact de ces fluctuations va potentiellement affecter des vies humaines...

Snyder (2003 : 2004) et Tanonkou (2007) proposent des états de l'art très complets des modèles stochastiques existants vis-à-vis des problèmes de location/allocation. La plupart des modèles ont comme objectif la minimisation des coûts ou la maximisation du profit de l'ensemble du réseau logistique. Certains modèles sont développés en utilisant des approches probabilistes, d'autres des approches dynamiques. Ces auteurs indiquent que les méthodes développées utilisent le plus souvent des heuristiques basées sur la relaxation lagrangienne, la recherche Tabou ou les algorithmes génétiques.

Pour Snyder (2006) toujours, les problèmes de localisation robustes sont plus difficiles à résoudre. Néanmoins ces modèles sont nécessaires car plus réalistes. La plupart de ces modèles s'inspirent de recherches antérieures sur les modèles stochastiques. On citera par exemple les travaux de (Bhattacharya et al 1992), (Canós et al., 1999), (Zhou et Liu, 2007), (Zhou et Liu, 2003), (Mehdizadeh et al., 2011), ou de (Bilsel et Ravindran, 2011).

3. Conception des chaînes logistiques humanitaires (CLH).

3.1. Les spécificités du monde humanitaire à prendre en compte.

Au cours de la phase de préparation, les humanitaires planifient leur réponse (distribution des secours) en étudiant les infrastructures existantes et les ressources disponibles (Duran et al., 2011). Une des principales difficultés rencontrées pour concevoir un réseau logistique qui restera efficace et efficient dans un environnement de crise est dû à la fiabilité des infrastructures. En effet, dans de nombreux cas, les routes, voies ferrées, ponts, aéroport peuvent être détruits ou endommagés par la catastrophe. Par conséquent, la performance attendue du réseau peut être considérablement dégradée. Pendant le tremblement de terre d'Haïti en 2010 par exemple, la situation post séisme trouvée par les acteurs humanitaires comportait beaucoup d'obstacles liés à la dégradation des infrastructures et a fortement compromis l'efficacité et l'efficience de la réponse.

Par conséquent, la réponse planifiée peut être perturbée ou rendue inapplicable par ces aléas. Si de tels changements soudains de la demande ou de l'offre se produisent lors d'une opération humanitaire, un problème complexe de re-planification apparaît. Il concerne les décisions relatives à la réallocation des stocks et le transport des articles de secours dans un environnement incertain (Rottkemper et al., 2011).

Le problème de conception de la Chaîne Logistique Humanitaire (CLH) peut être défini comme la capacité à concevoir un réseau cohérent qui reste en mesure de gérer de manière adéquate la réponse à une catastrophe en dépit des défaillances ou des insuffisances des infrastructures et des ressources potentielles. Fondamentalement, notre travail de recherche consiste à proposer un modèle de localisation innovant afin d'améliorer la résilience et l'efficience de la réponse humanitaire face aux perturbations prévisibles des infrastructures logistiques. Bien que l'environnement change très vite et de manière imprévisible après une catastrophe, Kovács et Spens (2007) affirment, que les humanitaires pourraient bénéficier de l'utilisation de systèmes d'aide à la décision portant sur l'optimisation de leurs réseaux logistiques. De plus, il existe un consensus parmi les experts sur le terrain pour estimer qu'il y a beaucoup de leçons à retirer du monde de l'industrie. Certaines pratiques du monde du commerce pourraient être adaptées et utilisées dans le monde humanitaire. On peut affirmer que, bien que la logistique humanitaire possède des caractéristiques distinctes, les principes de base de la logistique des entreprises peuvent s'y appliquer (Kovács et Spens, 2007 ; Charles, 2010).

Si une large majorité de la recherche publiée est déterministe, les chercheurs, en particulier ceux travaillant sur l'humanitaire, proposent maintenant des modèles stochastiques afin de mieux prendre en compte l'incertitude (Martel et al., 2013). Mais que l'approche soit stochastique ou non, le véritable problème vient du fait que les catastrophes naturelles sont pour la plupart difficile à prévoir et que la demande induite par ces catastrophes encore plus (Cassidy, 2003 ; Murray, 2005). Il faut ajouter à cela, qu'une fois la crise déclenchée, l'environnement change si rapidement que les informations sur la situation réelle ne sont pas disponibles à temps. De plus, une analyse approfondie d'un réseau logistique doit prendre en compte les coûts de transport, la

taille des entrepôts, les contraintes de l'environnement, les ratios de rotation des stocks, les coûts de stockage, les niveaux de service et beaucoup d'autres données et paramètres. Comme cela a été évoqué précédemment, ces données et paramètres sont assez difficiles à recueillir dans le monde humanitaire.

3.2. Etat de l'art de la conception de CLH.

Les articles scientifiques s'intéressant aux CLH étaient peu nombreux jusque vers les années 2000. Depuis cette date, dans les bases de données académiques (*Science Direct*, *IsiWeb*) leur nombre est croissant chaque année. Et nous ne comptons pas les articles non référencés dans ces bases, publiés dans des journaux spécifiques relatifs aux réfugiés, aux pays en voie de développement, à la santé ou dans la littérature militaire.

Altay et Green (2006), Kovács (2007), Simpson et Hancock (2009), Lettieri et al. (2009) et plus récemment Galindo et Batta (2013) présentent des revues bibliographiques sur la littérature relative à la recherche dans le monde humanitaire. Ces revues de littérature ont des portées différentes. Certains de ces papiers s'intéressent à l'ensemble des articles liés à la gestion des catastrophes avec une approche gestion des opérations et recherche opérationnelle. D'autres mettent plus spécifiquement l'accent sur les articles concernant la CLH.

Il ressort de l'ensemble de ces articles que la littérature académique sur la logistique humanitaire tend à se concentrer sur la phase de préparation de secours aux sinistrés. Si nous nous référons à Altay (2005), ce que Kovács et Spens (2007) appelle la phase de préparation se divise en deux axes :

- Les efforts d'atténuation pour limiter l'impact de la crise potentielle ;
- Les efforts de préparation pour préparer l'aide à apporter après la survenue.

Pourtant, même avec cette distinction, le travail effectué avant la survenue d'une catastrophe vient en premier dans les études. Ceci est en phase avec le fait que, si les fonds sont abondants pour l'intervention immédiate, le financement de la phase de préparation, si vital pourtant, est souvent négligé par les bailleurs de fonds. N'ayant pas de fonds pour travailler sur cette phase ni aucune pression de la part des bailleurs de fonds pour le faire, les ONGs consacrent la plupart de leurs efforts sur les opérations de secours immédiats, la recherche et la mise en œuvre de moyens plus efficaces pour fournir une assistance dans les premières semaines suivant la catastrophe. Cette brèche laisse une formidable opportunité aux universitaires pour chercher des solutions efficaces en matière de préparation et d'atténuation des catastrophes. Ces travaux portent essentiellement sur cinq aspects intéressant les opérations logistiques :

- La gestion des connaissances afin de capitaliser sur les opérations passées et de transférer la connaissance aux prochaines opérations logistiques ;
- Les ressources financières pour assurer la possession de fonds suffisant pour préparer et lancer les opérations ;
- Les ressources humaines : sélection et entraînement de personnes aptes à planifier, coordonner ou assurer les opérations si nécessaire ;

- La collaboration entre acteurs pour trouver des moyens de travailler harmonieusement et efficacement avec les autres intervenants sur le terrain (gouvernements, militaires, sécurité civile autres ONGs et intervenants privés) ;
- Le management des opérations proprement dit : gestion des stocks et des transports, développement de technologies et de logiciels supports, mesures de performance dans le domaine humanitaire.

En ce qui concerne plus spécifiquement les problèmes de localisation en contexte humanitaire, la littérature se partage entre phase de préparation et phase de réponse. Hale et Moberg (2005), Salmeron (2010), Rawls et Turnquist (2010), Mete et Zabinsky (2010) s'intéressent au prépositionnement de structures locales dédiés. D'autres modèles de localisation dédiés au secteur caritatif portent sur la phase de réponse. On peut citer Barbarosoglu et al. (2002), Ozdamar et al. (2004), Yi et Ozdamar (2007), Campbell et al. (2008) et Rath et Gutjahr (2014).

4. Localisation d'entrepôts de premier secours

Notre objectif est de fournir la conception d'une chaîne logistique dans le cadre de l'intervention humanitaire pour supporter la mise en œuvre des secours en cas de crise (en déterminant l'emplacement, le nombre et la taille des entrepôts). La configuration du réseau et la conception devraient idéalement permettre d'envoyer tous les produits nécessaires aux moments nécessaires de la manière la plus efficace, même si l'infrastructure a été partiellement ou totalement endommagée lors de la catastrophe. La principale originalité de notre proposition consiste à garantir l'efficacité de la réponse malgré les perturbations potentielles sur l'infrastructure, tout en maximisant l'efficacité (en minimisant les coûts). En conséquence le modèle est de type optimisation linéaire mixte stochastique.

Pour faciliter la lecture des données et variables, nous adopterons par la suite les conventions suivantes :

- Une donnée a un nom écrit en minuscule : cg = capacité globale fixé par le planificateur ;
- Une variable de décision a un nom écrit en majuscule : C = capacité à déterminer ;
- Les indices seront écrits entre parenthèses : $C(j)$, $X(i,j)$.

4.1. Présentation du cas d'application numérique

Afin de rendre plus concret la problématique que nous traitons et illustrer les solutions retenues, nous allons travailler en nous appuyant sur un petit exemple représentatif. Nous nous plaçons dans une zone géographique soumise à des risques de catastrophes naturelles récurrentes dues à des tremblements de terre et des vagues de froid. En effet, cette zone est traversée d'ouest en est par une barrière montagneuse qui la coupe en deux. Cette barrière montagneuse crée des conditions climatiques différentes sur les flancs nord et sud et restreint les capacités de transport nord/sud. Cette zone est de plus à la frontière de deux plaques tectoniques et sujette au séisme. Pour secourir la population, on décide d'implanter des entrepôts dans lesquels seront stockés des kits de première urgence.

Nous nous plaçons sous les hypothèses présentées au chapitre précédent pour la construction de scénarios. Il est possible de collecter pour cette zone des données suffisantes sur les catastrophes survenues dans les dix dernières années (étape 1). Le zonage retenu pour l'exemple est purement géométrique et divise la zone en 3 x 4 régions (étape 2). Il est possible d'implanter un entrepôt dans chacune des régions. La « carte » de la figure suivante reprend cette partie.

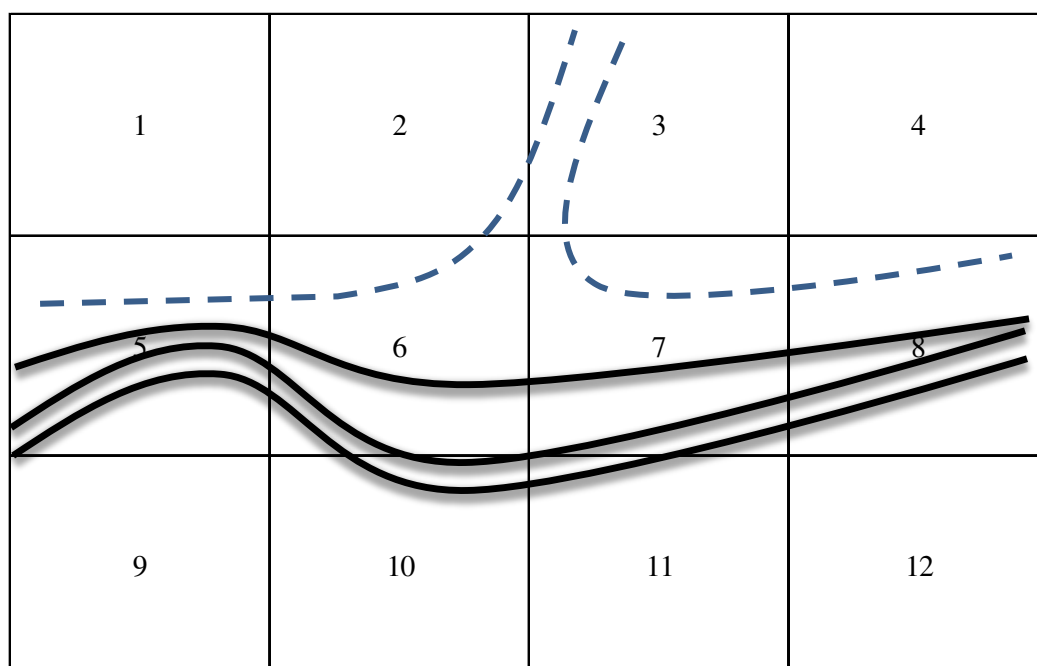


Figure IV-2 : Carte de la zone étudiée avec les montagnes et les plaques tectonique.

Pour l'étape 3, nous retiendrons trois niveaux de crise (forte, moyenne ou faible). Généralement, une crise frappe plusieurs régions avec des intensités variables selon la région. Par exemple, un tremblement de terre de forte intensité dont l'épicentre est dans la région 2 (crise forte) aura comme conséquence des crises moyennes dans les régions 3 et 6. Les vagues de froid toucheront à des degrés divers les régions 5, 6, 7 et 8 simultanément. En se basant sur les historiques des crises du passé, douze scénarios de catastrophe ont été identifiés et leur probabilité de survenue estimée. Le scénario 1 par exemple correspond à la survenue d'un tremblement de terre de forte intensité sur la faille séparant les régions 3 et 7. La crise sera forte sur ces deux régions et se répercutera-en suivant la faille, sous forme de crise moyenne sur les régions 6 et 7 et faible sur les régions 2 et 4.

Scénario	Proba (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	9	-	-	F	-	-	M	F	M	-	-	-	-
2	13	-	M	-	-	-	M	-	-	-	-	-	-
3	5	M	F	M	-	-	F	-	-	-	-	-	-
4	10	-	M	M	-	-	-	M	-	-	-	-	-
5	3	-	M	F	M	-	M	-	-	-	-	-	-
6	12	-	-	-	-	M	M	-	-	-	-	-	-
7	6	-	F	-	-	-	F	M	-	-	-	-	-
8	8	F	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	12	-	-	-	M	-	-	M	F	-	-	-	M
10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	M	M	-	-
11	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F	M
12	5	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	M	F

Table IV-1 : Cas exemple - Scénarios (- = Faible : M = Moyenne : F = Forte).

En cas de crise d'amplitude moyenne ou forte, une partie de la population doit être secourue. Les secours sont constitués d'un kit standard (vivre, couverture, médicaments) délivré à chaque personne. A la fin de l'étape 4 (évaluer l'impact sur les populations), on a pu dresser le tableau suivant qui donne le nombre de personnes à secourir par région selon que la crise est moyenne ou forte.

Région	Crise moyenne	Crise forte
1	2 000	3 000
2	3 500	6 000
3	4 500	8 000
4	1 500	2 800
5	500	1 000
6	1 000	1 500
7	3 000	5 000
8	1 500	3 500
9	2 000	3 500
10	3 000	5 000
11	4 000	7 000
12	2 000	4 500

Table IV-2 : Cas exemple - Nombre de personnes à secourir.

On obtient ainsi les demandes correspondant à chacun des scénarios :

Scénario	Demande												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0	0	8 000	0	0	1 000	5 000	1 500	0	0	0	0	15 500
2	0	3 500	0	0	0	1 000	0	0	0	0	0	0	4 500
3	2 000	6 000	4 500	0	0	1 500	0	0	0	0	0	0	14 000
4	0	3 500	4 500	0	0	0	3 000	0	0	0	0	0	11 000
5	0	3 500	8 000	1500	0	1 000	0	0	0	0	0	0	14 000
6	0	0	0	0	500	1 000	0	0	0	0	0	0	1 500
7	0	6 000	0	0	0	1 500	3 000	0	0	0	0	0	10 500
8	3 000	3 500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6 500
9	0	0	0	1500	0	0	3 000	3 500	0	0	0	2 000	10 000
10	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	3 000	0	0	5 000
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7 000	2 000	9 000
12	0	0	0	0	0	0	0	1 500	0	0	4 000	4 500	10 000
Espérance	340	1 850	1 635	225	60	535	1 290	630	200	300	690	605	8360

Table IV-3 : Cas exemple – Demandes associées à chaque scénario (en nombre de kits).

L'étape 5 a pour objectif d'évaluer l'impact d'une catastrophe sur les infrastructures. Une catastrophe peut modifier l'environnement logistique de deux manières.

- En restreignant les capacités de transport existant entre régions ;
- En diminuant les capacités de réponse d'un entrepôt où ont été stockés des kits d'urgence.

Il est possible en temps normal de circuler d'une région à l'autre. Mais la zone montagneuse Est/Ouest restreint les capacités de transport entre deux régions et augmente le coût de transport. Le tableau suivant donne le nombre de kits $f(i,j)$ que l'on peut transporter entre deux régions i et j lorsque les réseaux de transports ne sont pas détériorés ou coupés.

Flux initial inter-régions $f(i,j)$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4 000	3 500	3 500	3 000	4 000	4 000	4 000	3 000	2 400	3 200	3 200	2 800
3 500	3 500	4 000	3 000	3 000	3 500	3 500	3 000	2 400	3 200	3 200	2 800
3 500	4 000	4 000	3 000	4 000	4 000	4 000	3 000	2 400	3 200	3 200	2 800
3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	2 000	2 800	2 800	2 400
4 000	3 000	4 000	3 000	4 000	2 000	1 600	1 200	2 400	2 400	2 400	2 400
4 000	3 500	4 000	3 000	2 000	4 000	4 000	2 500	2 400	2 000	2 000	2 000
4 000	3 500	4 000	3 000	1 600	4 000	4 000	2 400	800	1 200	1 600	1 200
3 000	3 000	3 000	3 000	1 200	2 500	2 400	3 000	1 200	1 200	1 200	1 200
2 400	2 400	2 400	2 000	2 400	2 400	800	1 200	4 000	2 400	2 400	2 400
3 200	3 200	3 200	2 800	2 400	2 000	1 200	1 200	2 400	4 000	2 400	2 400
3 200	3 200	3 200	2 800	2 400	2 000	1 600	1 200	2 400	2 400	4 000	3 200
2 800	2 800	2 800	2 400	2 400	2 000	1 200	1 200	2 400	2 400	3 200	4 000

Table IV-4 : Cas exemple – Flux inter-régions nominaux (en nombre de kits).

La majorité des transports se fait par des routes assez vulnérables, notamment les routes de montagne. Un tremblement de terre de forte intensité ou de fortes chutes de neige peuvent les couper, ne laissant que l'acheminement aérien, les largages par hélicoptère ou le passage de petits convois. Pour prendre ceci en compte, nous considérerons qu'après une catastrophe, il ne reste qu'une partie $m(i,j)$ du flux initial $f(i,j)$ entre les deux régions i et j . Pour déterminer $m(i,j)$, nous travaillerons en deux phases. Un premier tableau donne le pourcentage du réseau routier utilisable dans la région i après une catastrophe de niveau moyen ou fort.

Région	Impact flux	
	Moyen	Fort
1	90 %	75 %
2	90 %	75 %
3	90 %	75 %
4	90 %	75 %
5	80 %	60 %
6	80 %	60 %
7	80 %	60 %
8	80 %	60 %
9	90 %	80 %
10	90 %	80 %
11	90 %	80 %
12	90 %	80 %

Table IV-5 : Cas exemple – Capacité du réseau (% de la capacité nominale).

Pour déterminer le pourcentage de flux résiduel entre les régions i et j , nous considérons que ces pourcentages sont multiplicatifs :

- Si la région 1 subit une crise forte et la région 5 aucune crise ou une crise faible, le pourcentage sera de $90 \% \times 100 \% = 90 \%$. Le flux maximal entre les régions 1 et 5 sera donc de 3600 kits ($90 \% \times 4000$) ;
- Si les régions 1 et 5 subissent une crise moyenne simultanément, le pourcentage entre ces deux régions sera de $90 \% \times 80 \% = 72 \%$. Le flux maximal entre les régions 1 et 5 sera donc 2880 kits ($72 \% \times 4000$) ;
- Si la région 1 subit une crise forte et la région 5 une crise moyenne, le pourcentage sera de $75 \% \times 80 \% = 60 \%$. Le flux sera de 2400 kits.

Le second risque est la perte de tout ou partie des stocks entreposés suite à la catastrophe. A Haïti en 2010, la solution retenue avait été d'implanter un seul stock à Port au Prince. Ceci était logique compte tenu de la répartition de la population et des voies de communication. Lors du tremblement de terre, cet entrepôt a été détruit et n'a pu servir... Pour tenir compte de ce risque, nous introduisons un paramètre donnant le pourcentage utilisable $p(j)$ de la capacité de l'entrepôt $C(j)$ selon l'importance de la crise frappant la région j . Ces pourcentages de la capacité nominale sont donnés dans le tableau suivant.

Région	Impact sur les stocks $p(j)$	
	Moyen	Fort
1	80 %	60 %
2	80 %	60 %
3	80 %	60 %
4	80 %	60 %
5	70 %	50 %
6	70 %	50 %
7	70 %	50 %
8	70 %	50 %
9	90 %	65 %
10	90 %	65 %
11	90 %	65 %
12	90 %	65 %

Table IV-6 : Cas exemple - Capacité des entrepôts après la catastrophe.

La dernière étape de la démarche consiste maintenant à déterminer où seront implantés les entrepôts dans lesquels seront stockés les kits de première urgence. Pour compléter l'exemple, nous rajoutons quelques hypothèses supplémentaires :

- Il est possible d'implanter au plus un seul entrepôt par région ;
- Pour des raisons financières et pour assurer un meilleur contrôle des produits stockés, le nombre d'entrepôts retenu doit être faible (3 maximum) ;
- L'ensemble de ces entrepôts doit permettre d'intervenir pour secourir au plus 14000 personnes. Financièrement, les autorités n'ont pas les moyens financiers de stocker plus. En outre, au-delà de 14000 personnes, il semble possible de mobiliser aisément la générosité internationale, ce qui n'est pas le cas des catastrophes petites et moyennes

récurrentes. On constate déjà que dans le scénario 1 (demande 15500), il ne sera pas possible de subvenir entièrement aux besoins ;

- Pour assurer une meilleure dissémination des stocks, nous fixons une capacité minimale $a(j)$ et maximale $b(j)$ d'un stock implanté dans la région j . Ici $a(j) = 2000$ et $b(j) = 6000$;
- L'implantation d'un entrepôt dans la région induit un coût de création $f(j)$ et des coûts de surveillance, de renouvellement des produits stockés périssables ou avec des dates de péremption. Ces coûts sont proportionnels à la capacité $C(j)$ stocké dans l'entrepôt et égaux à $v(j) \times C(j)$. Ces coûts varient d'une région à l'autre.

Région	Capa min kit $a(j)$	Capa max kit $b(j)$	Coût fixe implantation entrepôt $f(j)$	Coût variable/kit $v(j)$
1	2 000	6 000	1 050	1,0
2	2 000	6 000	1 000	1,0
3	2 000	6 000	1 000	1,0
4	2 000	6 000	1 050	1,0
5	2 000	6 000	1 200	1,1
6	2 000	6 000	1 100	1,2
7	2 000	6 000	1 100	1,1
8	2 000	6 000	1 300	1,1
9	2 000	6 000	1 200	1,3
10	2 000	6 000	1 100	1,1
11	2 000	6 000	1 100	1,1
12	2 000	6 000	1 000	1,1

Table IV-7 : Cas exemple – Capacités et coûts d'entreposage par région.

Les coûts de transport entre régions sont variables en fonction de la distance et des moyens de transport utilisables. Le tableau suivant donne le coût de transport d'un kit entre deux régions.

Coût transport $t(i,j)$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1	2	3	1	2	3	4	3	4	5	6
1	0	1	2	2	1	2	3	4	3	4	5
2	1	0	1	3	2	1	2	5	4	3	4
3	2	1	0	4	3	2	1	6	5	4	3
4	3	2	1	0	1	2	3	2	3	4	5
5	4	3	2	1	0	1	2	3	2	3	4
6	5	4	3	2	1	0	1	4	3	2	3
7	6	5	4	3	2	1	0	5	4	3	2
8	5	4	3	2	1	0	1	4	3	2	3
9	4	3	2	1	0	1	2	3	2	1	0
10	3	2	1	0	1	2	3	2	1	0	1
11	2	1	0	1	2	3	2	1	0	1	2
12	1	0	1	2	3	2	1	0	1	2	3

Table IV-8 : Cas exemple – Coûts de transport entre les régions.

4.2. Contribution n°3 : Modèle de base de conception d'une CLH robuste pour un scénario donné.

4.2.1. Modèle mathématique.

Dans cette partie, nous allons modéliser le problème en considérant un seul scénario (la survenue d'une seule catastrophe). Nous voulons déterminer où doivent être ouverts les entrepôts qui répondent au mieux et avec quelle capacité. Comme dans tous les problèmes de localisation, nous aurons une variable binaire $Y(j)$ qui vaudra 1 si un entrepôt est implanté dans la région j et 0 sinon. Nous avons besoin d'une variable $C(j)$ pour déterminer la capacité de l'entrepôt j . Le nombre de kits expédiés de l'entrepôt situé en j vers la région i sera représenté par une variable $X(i,j)$.

Notre objectif est avant tout de fournir l'ensemble des secours demandés (efficacité). Mais en fonction du contexte, une telle solution peut ne pas exister. On notera $R(i)$ le nombre de demande non satisfaite dans la région i . Une demande non satisfaite aura un coût élevé s (ici 10 000). Une manière d'optimiser l'efficacité sera donc de minimiser le coût de non satisfaction comme suit :

$$\sum sR(i)$$

A fourniture égale, pour des raisons d'efficacité, nous voulons la solution logistique la moins coûteuse (implantation et gestion des entrepôts, transport). Globalement notre fonction objectif consistera à minimiser le coût de non satisfaction plus les coûts logistiques.

Ce problème peut se modéliser sous forme du Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) suivant :

Index :

i	index de la demande
j	index des entrepôts potentiels

Paramètres :

$a(j)$	capacité maximale de l'entrepôt en j
$b(j)$	capacité minimale de l'entrepôt en j
cg	capacité globale de stockage
d_i	demande à satisfaire en i
f_j	coût d'implantation de l'entrepôt
$m(i,j)$	flot maximum entre i et j
nw	nombre maxi d'entrepôt
$P(j)$	pourcentage de la capacité utilisable
s	coût de non satisfaction d'une demande
$t(i,j)$	coût de transport entre i et j
$v(j)$	coût variable de gestion de l'entrepôt

Variables :

$C(j)$	capacité de l'entrepôt en j
$R(i)$	demande en i non satisfaite
$X(i,j)$	secours à i fournis par j
$Y(j)$	1 si l'entrepôt est implanté en j , 0 sinon

Programme mono scénario (PMS) :

$$\min = s. \sum_i R(i) + \sum_j (f(j).Y(j) + v(j).C(j)) + \sum_i \sum_j t(i, j).X(i, j)$$

$$(1) \forall j, \sum_i X(i, j) \leq Y(j). \sum_i d(i)$$

$$(2) \forall i, \sum_j X(i, j) + R(i) = d(i)$$

$$(3) \forall j, \sum_i X(ij) \leq p(j).C(j)$$

$$(4) \forall j, a(j).Y(j) \leq C(j) \leq b(j).Y(j)$$

$$(5) \forall i \forall j, X(i, j) \leq m(i, j)$$

$$(6) \sum_j Y(j) \leq nw$$

$$(7) \sum_j C(j) = cg$$

$$(8) \forall j Y_j \in \{0,1\}$$

- (1) Assure que l'entrepôt j est ouvert s'il fournit des secours ;
- (2) La demande en i est fournie par les entrepôts ou non satisfaite ;
- (3) L'entrepôt j ne peut pas envoyer plus que sa capacité utilisable ;
- (4) Si l'entrepôt est ouvert sa capacité est entre a(j) et b(j). Sinon la capacité est de 0 ;
- (5) Les flux entre i et j sont limités ;
- (6) Le nombre d'entrepôt ouvert est limité ;
- (7) La capacité globale des entrepôts ouverts est cg.
- (8) Variable binaire décrivant l'ouverture d'un entrepôt ou non.

4.2.2. Application numérique.

Appliquons le programme au scénario 1. On veut ouvrir un maximum de trois entrepôts avec une capacité totale de 14000 kits. La demande totale de 15500 kits est supérieure à la capacité totale stockée. On aura donc au minimum 1500 démunis soit un pourcentage de 9,7 %.

Commençons par calculer les différents paramètres associés au scénario 1. La demande pour les régions sera :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
0	0	8000	0	0	1000	5000	1500	0	0	0	0	15500

Table IV-9 : Application numérique PMS – Demande par région.

L'impact sur les stocks existant sera alors :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100 %	100 %	70 %	100 %	100 %	85 %	55 %	70 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Table IV-10 : Application numérique PMS – Impact sur les stocks régionaux.

Les flux maximaux de transport entre régions sont donnés ci-dessous :

de\vers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4 000	3 500	2 625	3 000	4 000	3 200	2 400	2 400	2 400	3 200	3 200	2 800
2	3 500	3 500	3 000	3 000	3 000	2 800	2 100	2 400	2 400	3 200	3 200	2 800
3	2 625	3 000	2 250	2 250	3 000	2 400	1 800	1 800	1 800	2 400	2 400	2 100
4	3 000	3 000	2 250	3 000	3 000	2 400	1 800	2 400	2 000	2 800	2 800	2 400
5	4 000	3 000	3 000	3 000	4 000	1 600	960	960	2 400	2 400	2 400	2 400
6	3 200	2 800	2 400	2 400	1 600	2 560	1 920	1 600	1 920	1 600	1 600	1 600
7	2 400	2 100	1 800	1 800	960	1 920	1 440	1 152	480	720	960	720
8	2 400	2 400	1 800	2 400	960	1 600	1 152	1 920	960	960	960	960
9	2 400	2 400	1 800	2 000	2 400	1 920	480	960	4 000	2 400	2 400	2 400
10	3 200	3 200	2 400	2 800	2 400	1 600	720	960	2 400	4 000	2 400	2 400
11	3 200	3 200	2 400	2 800	2 400	1 600	960	960	2 400	2 400	4 000	3 200
12	2 800	2 800	2 100	2 400	2 400	1 600	720	960	2 400	2 400	3 200	4 000

Table IV-11 : Application numérique PMS – Flux maximums inter-régions.

La solution optimale est d'ouvrir les entrepôts dans la région 1, 2 et 4 avec des capacités respectives de 2450, 6000 et 5550. Le tableau suivant synthétise les résultats :

Régions	Expédié de l'entrepôt			Demande			% démunis
	E1	E2	E4	Livrée	Non livrée	Total	
R3	2 450	3 000	2 250	7 700	300	8 000	3,80 %
R6	0	1 000	0	1 000	0	1 000	0,00 %
R7	0	2 000	1 800	3 800	1 200	5 000	24,00 %
R8	0	0	1 500	1 500	0	1 500	0,00 %
Stock	2 450	6 000	5 550	14 000	1 500	15 500	9,70 %

Table IV-12 : Application numérique PMS – Synthèse des résultats.

Les coûts logistiques sont de 17100 pour l'ouverture et la gestion des entrepôts et de 20250 pour le transport. Dans cette solution le nombre de demande non satisfaite est de 1500, ce qui est le minimum possible.

4.2.3. Extension du modèle

Considérons la pénurie. La demande est de 15500 pour 14000 kits stockés, soit 9,7 % de demande impossible à satisfaire. Dans la solution, la région 7 reçoit environ 76 % de ses besoins alors que la région 3 en reçoit 96,2 % et les régions 6 et 8 en reçoivent l'intégralité. Cette solution est optimale en ce qui concerne le nombre de kits effectivement distribués et les coûts logistiques. Mais elle est probablement humainement et politiquement inacceptable surtout pour la population de la région 7 :

- *Humainement* : on peut estimer que si un fort pourcentage des besoins est livré, il se mettra en place une forme d'entraide dans la population et dans les familles pour partager les premiers secours. Ce type d'entraide sera plus difficile à se réaliser si les secours sont très limités ;
- *Politiquement* : des disparités fortes de traitement d'une région à l'autre constituent un facteur de tension politique après la catastrophe, en particulier si l'aide est fournie par un organisme gouvernemental.

Deux méthodes peuvent alors être envisagées pour lisser la pénurie :

- Soit on ajoute au programme (PMS) une contrainte supplémentaire limitant le pourcentage α de demande non reçu :

$$(9) \forall i, \sum_j R(i) \leq \alpha.d(i)$$

En prenant $\alpha = 9,7 \%$, on obtiendra une solution parfaitement équitable en termes de répartition des demandes non satisfaites ;

- Soit on restreint les demandes initiales, avant de faire tourner le programme, pour aboutir à une demande totale de 14 000 correspondants aux secours possibles. Pour avoir une répartition équitable, on appliquera un coefficient de 90,1 %. En pratique, cette seconde solution laisse au planificateur le choix de la décision. Supposons que la région 8 soit facilement accessible depuis un pays voisin et que l'aide internationale complémentaire puisse lui parvenir rapidement. Dans ce cas, le responsable de l'aide pourra, par exemple, décider de réserver l'ensemble des 14 000 kits aux autres régions et assurer la demande des 1500 de la région 8 via l'aide internationale.

La solution totalement équitable utilise les mêmes entrepôts mais les coûts de transport augmentent de 4,3 % et passent de 20250 à 21111.

Régions	Expédié de l'entrepôt			Demande			% démunis
	E1	E2	E4	Livrée	Non livrée	Total	
R3	1 979	2 997	2 250	7 226	774	8 000	9,70 %
R6	0	903	0	903	97	1 000	9,70 %
R7	616	2 100	1 800	4 516	484	5 000	9,70 %
R8	0	0	1 355	1 355	145	1 500	9,70 %
Stock	2 450	6 000	5 550	14 000	1 500	15 500	9,70 %

Table IV-13 : Application numérique PMS étendue – Synthèse des résultats.

4.2.4. Application multi scénarios.

Le programme PMS permet de trouver la meilleure affectation pour un scénario donné. Le tableau ci-dessous va nous permettre de détecter les scénarios critiques (colonne « démunis »). Ici la mauvaise surprise vient du scénario 5 où on découvre qu'on ne pourra pas satisfaire les

besoins, bien que les stocks constitués (14000) soit égaux aux besoins (14000). Ceci est dû aux effets de détérioration des infrastructures. La perte d'une partie des kits stockés apparaît quand les quantités stockées surpassent les quantités distribuées (colonne « kits perdus »). Enfin les deux dernières colonnes permettent d'avoir des estimations des coûts minimaux.

Sc.	Demande	Démunis	Démunis %	Stockage	Kits perdus	Coûts	
						transport	entrepôt
1	15 500	1 500	9,7 %	14 000	0	20 250	17 100
2	4 500	0	0	5 000	500	1 000	6 000
3	14 000	0	0	14 000	0	20 000	18 255
4	11 000	0	0	13 183	2 183	0	16 683
5	14 000	960	6,9 %	14 000	0	20 600	18 380
6	1 500	0	0	2 000	500	500	3 500
7	10 500	0	0	13 333	2 833	3 500	16 967
8	6 500	0	0	7 639	1 139	0	9 689
9	10 000	0	0	12 076	2 076	3 500	16 026
10	5 000	0	0	5 380	380	0	8 663
11	9 000	0	0	10 667	1 667	2 200	13 833
12	10 000	0	0	12 587	2 587	0	17 246

Table IV-14 : Application numérique – Identification des scénarios critiques.

Le second tableau donne les entrepôts ouverts et les capacités stockées. Ces résultats peuvent éventuellement permettre de détecter si certaines localisations sont à privilégier.

Sc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Stockage
1	2 450	6 000	0	5 550	0	0	0	0	0	0	0	0	14 000
2	0	5 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5 000
3	0	0	0	4 950	3 125	0	5 925	0	0	0	0	0	14 000
4	0	3 889	5 294	0	0	0	4 000	0	0	0	0	0	13 183
5	0	0	3 200	0	4 800	0	6 000	0	0	0	0	0	14 000
6	0	0	0	0	0	2 000	0	0	0	0	0	0	2 000
7	0	6 000	2 000	0	0	0	5 333	0	0	0	0	0	13 333
8	3 750	3 889	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7 639
9	0	0	0	4 067	0	0	5 787	0	0	0	0	2 222	12 076
10	0	0	0	0	0	0	0	0	2 222	3 158	0	0	5 380
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6 000	4 667	10 667
12	0	0	0	0	0	0	0	2 143	0	0	4 444	6 000	12 587

Table IV-15 : Application numérique – Entrepôts ouverts et capacités stockées.

Ce modèle (PMS) peut aussi être utilisé pour valider des solutions existantes ou des localisations prévues a priori. L'implantation de ces entrepôts de première nécessité peut s'avérer politiquement sensible et les décisions peuvent être prises sur des critères d'aménagement du territoire, de taille de la population de chaque région, des impôts versés par chaque région, voire purement électoralistes. Sur l'exemple, les régions les plus densément peuplées sont les régions 3,

11 et 2. Géographiquement ces régions sont centrales et de part et d'autres de la chaîne montagneuse. Sur le papier (ou dans les médias), le choix de ces trois régions est défendable. Supposons une répartition de 5000 en régions 3 et 11 et 4000 en région 2. En fixant les variables de décision correspondantes, nous obtenons les résultats suivants.

Scénario	Probabilité (%)	Coûts		Démunis
		Transport	Entrepôt	
1	9	19 020	17 600	3 000
2	13	1 900	17 600	0
3	5	18 500	17 600	1 750
4	10	9 670	17 600	0
5	3	17 760	17 600	1 900
6	12	2 000	17 600	0
7	6	12 700	17 600	0
8	8	5 900	17 600	0
9	12	16 500	17 600	0
10	10	8 680	17 600	0
11	7	17 440	17 600	0
12	5	20 000	17 600	0
Espérance		10 926	17 600	415

Table IV-16 : Application numérique – Coûts finaux.

Nous verrons au paragraphe suivant que cette solution est bonne en termes de coût de transport mais ne l'est plus en ce qui concerne les victimes non secourus. Bien entendu, on pourrait envisager une approche de type méta-heuristique utilisant le modèle mono-scénario. Une solution est donnée par le choix des sites et des capacités. En jouant sur le choix des sites et/ou sur les capacités, il est facile de constituer des solutions voisines (méthode de voisinage) ou d'opérer des mutations (méthode génétique). Ces méta heuristiques pourraient permettre de trouver une bonne solution, mais au prix de nombreux essais.

4.3. Contribution n° 4 : Programme Stochastique Multi-Scénarios (PSMS) pour la conception d'une CLH robuste.

4.3.1. Modèle mathématique.

L'approche mono-scénario n'est donc pas suffisante. Par nature, nous ignorons précisément où vont arriver les catastrophes et nous devons nous baser sur un ensemble de scénarios. Nous proposons donc d'utiliser une approche stochastique. On dispose de K scénarios de probabilités distinctes h_s . Comme dans tout problème stochastique, nous aurons maintenant deux types de variables : (1) Les variables indépendantes de tout scénario. Ici, nous voulons localiser et dimensionner des entrepôts permettant de répondre au mieux aux divers scénarios. Nous aurons toujours les variables binaires $Y(j)$ qui valent 1 si un entrepôt est implanté dans la région j et 0 sinon et les variable $C(j)$ pour déterminer la capacité de l'entrepôt j ou (2) Les variables liées à un scénario : $R(i,s)$ la demande non satisfaite dans le scénario s et $X(i,j,s)$ les secours à la région i fournis par l'entrepôt situé en j dans le scénario « s ».

La fonction objectif à minimiser comprendra donc deux parties : (i) les coûts d'implantation et de gestion des entrepôts qui sont indépendant des scénarios retenus et (ii) les coûts de transport et de non satisfaction de la demande dépendant des scénarios. Ces derniers seront minimisés en espérance. Le modèle sera donc le suivant.

Les variables dépendantes du scénario s retenu :

$R(i,s)$ demande en i non satisfaite dans scénario s
 $X(i,j,s)$ secours à i fournis par j dans scénario s

Index :

i index de la demande
j index des entrepôts potentiels
s scénario

Paramètres inchangés :

$a(j)$ capacité maximale de l'entrepôt en j
 $b(j)$ capacité minimale de l'entrepôt en j
cg capacité globale de stockage
 $f(j)$ coût d'implantation de l'entrepôt
nw nombre maxi d'entrepôt
s coût de non satisfaction d'une demande
 $t(i,j)$ coût de transport entre i et j
 $v(j)$ coût variable de gestion de l'entrepôt

Paramètres scénarisés :

$d(i,s)$ demande à satisfaire en i
 $h(s)$ Probabilité du scénario s
 $m(i,j,s)$ flot maximum entre i et j
 $p(j,s)$ pourcentage de la capacité utilisable

Variables inchangées :

$C(j)$ capacité de l'entrepôt en j
 $Y(j)$ 1 si l'entrepôt est implanté en j, 0 sinon

Variables scénarisées :

$R(i,s)$ demande en i non satisfaite dans scénario s
 $X(i,j,s)$ secours à i fournis par j dans scénario s

Programme stochastique multi-scénarios (PSMS) :

$$\min = s \sum_i \sum_s h(s).R(i,s) + \sum_j (f(j).Y(j) + v(j).C(j)) + \sum_i \sum_j \sum_s h(s).t(i,j).X(i,j)s$$

$$(1) \forall j, \sum_i X(i,j) \leq Y(j).MaxDmde$$

$$(2) \forall i, \forall s \sum_j X(i,j,s) + R(i,s) = d(i,s)$$

$$(3) \forall j, \forall s \sum_i X(i,j,s) \leq p(j,s).C(j)$$

$$(4) \quad \forall j, a(j).Y(j) \leq C(j) \leq b(j).Y(j)$$

$$(5) \quad \forall i \forall j \forall s, X(i, j, s) \leq m(i, j, s)$$

$$(6) \quad \sum_j y(j) \leq nw$$

$$(7) \quad \sum_j C(j) \leq cg$$

$$(8) \quad \forall j \quad Y_j \in \{0,1\}$$

4.3.2. Application numérique

Sur l'exemple, la solution est d'ouvrir les entrepôts des régions 1, 5 et 11 avec des capacités de 3700, 4620 et 5680. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Scénario	Probabilité (%)	Coûts		Démunis
		Transport	Entrepôt	
1	9	37 000	18 380	1 500
2	13	4 850	18 380	0
3	5	30 530	18 380	185
4	10	23 040	18 380	0
5	3	30 920	18 380	1 580
6	12	1 000	18 380	0
7	6	21 620	18 380	180
8	8	7 040	18 380	0
9	12	24 700	18 380	0
10	10	8 680	18 380	0
11	7	20 360	18 380	0
12	5	23 248	18 380	0
espérance		17 119	18 380	202

Table IV-17 : Application numérique PSMS – Résultats.

Il n'est pas possible de satisfaire tous les besoins dans quatre des scénarios (1, 3, 5 et 7). En espérance, le pourcentage de démuni sera de $202/8435 = 2,4 \%$.

4.3.3. Extension du modèle

Regardons en pourcentage la répartition des démunis entre régions :

Scenario	Pourcentage non satisfait							% moyen
	1	2	3	4	6	7	8	
1	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	30,0 %	0,0 %	9,7 %
3	0,0 %	0,0 %	4,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %
5	0,0 %	0,0 %	19,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	11,3 %
7	0,0 %	3,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,7 %

Table IV-18 : Application numérique PSMS – Pourcentage de non satisfaction.

Cette solution ne donne pas une répartition équitable de la non-satisfaction entre régions. Ceci est particulièrement probant pour la région 7 dans le scénario 1 et la région 3 dans le scénario 5. Là aussi, il est possible d'améliorer la répartition sans augmenter le nombre de démunis de chacun des scénarios. Pour cela, il nous faut connaître le pourcentage maximal $PM(s)$ de non satisfaction dans une région pour le scénario s . Dans la fonction objectif à minimiser, nous ajouterons un « coût » proportionnel aux $PM(s)$.

Soit $dn(s)$ le nombre de démunis obtenu précédemment pour le scénario s .

Dans le programme (PSMS), on ajoute :

- Les variables $PM(s)$;
- Les données $dn(s)$;
- Les contraintes supplémentaires suivantes pour les scénarios « s ».

A travers :

$$(9) \quad \forall s \quad PM(s) = \text{Max} \sum_i R(i, s) / d(i, s)$$

$$(10) \quad \forall s \quad \sum_i R(i, s) = dn(s)$$

(9) Donne le pourcentage maximum de démunis dans une région pour le scénario s

(10) Le nombre de démunis du scénario s reste identique.

Dans la fonction objectif à minimiser, on ajoute un coût proportionnel aux $PM(s)$. La solution obtenue conserve les mêmes entrepôts avec des capacités stockées identiques. Seuls les flux sont changés. Les coûts de transport augmentent alors de 0.6 %.

Scénario	Probabilité (%)	Coûts		Démunis
		Transport	Entrepôt	
1	9	37 923	18 380	1 500
2	13	4 850	18 380	0
3	5	30 702	18 380	185
4	10	23 040	18 380	0
5	3	30 920	18 380	1 580
6	12	1 000	18 380	-
7	6	21 620	18 380	180
8	8	7 040	18 380	0
9	12	24 700	18 380	0
10	10	8 680	18 380	0
11	7	20 360	18 380	0
12	5	23 248	18 380	0
espérance		17 210	18 380	202

Table IV-19 : Application numérique PSMS étendue – Synthèse des résultats.

Elle améliore la situation des scénarios 1 et 3, mais le problème reste entier pour le scénario 5.

Scénario	Pourcentage non satisfait							% moyen
	1	2	3	4	6	7	8	
1	0,0 %	0,0 %	11,5 %	0,0 %	0,0 %	11,5 %	0,0 %	9,7 %
3	1,3 %	1,3 %	1,3 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	0,0 %	1,3 %
5	0,0 %	0,0 %	19,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	11,3 %
7	0,0 %	3,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,7 %

Table IV-20 : Application numérique PSMS étendue – Non satisfaction.

4.3.4. Modèle multi-scénarios.

L'hypothèse de base retenue jusqu'ici était de trouver une solution qui minimise le nombre de démunis et ce, à moindre coût. Dans le cas où les secours doivent satisfaire des besoins vitaux immédiats, ce critère est indiscutable. On constate sur les deux résolutions précédentes que cet objectif rentre en conflit avec le critère de répartition équitable de la pénurie sur les régions. Dans un contexte où l'aide est mise en place par les pouvoirs publics et si le reste des secours peut être acheminé dans des délais courts, le critère de répartition équitable peut devenir prépondérant. Sur notre exemple, une solution robuste qui garantirait que dans tous les scénarios où c'est possible, toute région reçoit au minimum 95% de ses besoins peut être attrayante pour les décideurs.

Pour les scénarios 1 et 5 pour lesquels on sait d'avance que l'on aura un minimum de 9,7 % et 6,9% de pénurie, les seuils à respecter seront supérieurs ou égal à ces valeurs. Nous proposons de rajouter un tableau à remplir par les décideurs donnant le pourcentage maximum $px(s)$ de pénurie acceptable dans le scénario s .

Pour prendre en compte cette nouvelle contrainte, nous devons ajouter deux contraintes au programme (PSMS) :

$$(9) \quad \forall s \quad PMs = \text{Max} \sum_i Ris / dis$$

$$(11) \quad \forall s \quad PM(s) \leq pxs$$

(9) Donne le pourcentage maximum de démunis dans une région pour le scénario s (déjà utilisée précédemment).

(11) Limite la valeur du pourcentage maximum.

Le risque est d'aboutir à des programmes sans solution si les valeurs $px(s)$ sont trop faibles. Afin d'obtenir une réponse dans tous les cas, nous proposons de supprimer les contraintes (11) et d'ajouter une pénalité $w(s)$ si $PM(s)$ dépassent la valeur $px(s)$. Le coût de lissage sera alors proportionnel à ce dépassement. En définitif, les équations à ajouter seront :

$$(9) \quad \forall s \quad PMs = \text{Max} \sum_i Ris / dis$$

$$(12) \quad \text{CoutLissage} = \sum_s \sum_i (PM(s) - px(s)) * w(s)$$

Reprenons l'exemple. Ici nous visions un pourcentage de démunis maximum de 10 % pour le scénario 1, 8 % pour le scénario 5 et 5 % pour les autres. Pour éviter d'augmenter le pourcentage sur les scénarios 1 et 5 déjà critiques, nous avons pris des poids plus forts pour ces deux scénarios. Les seuils d'acceptation et coûts associés dans la table suivante :

Scénario	Pourcentage maximum	Pénalité si dépassement
1	10 %	10 000
2	5 %	1 000
3	5 %	1 000
4	5 %	1 000
5	8 %	5 000
6	5 %	1 000
7	5 %	1 000
8	5 %	1 000
9	5 %	1 000
10	5 %	1 000
11	5 %	1 000
12	5 %	1 000

Table IV-21 : Application numérique PSMS multi-scénarios.

La solution obtenue ouvre les entrepôts 1, 5 et 11 avec des capacités respectives de 3 900, 5 700 et 4 400. Sur ce petit exemple, les résultats sont très proches de ceux obtenus précédemment. La pénurie moyenne passe de 202 à 203. On gagne un petit peu sur le scénario 7 qui passe de 11,3 % à 10,9 % au détriment du scénario 3 qui passe de 1,3 % à 1,4 %. Pour les autres scénarios, les pourcentages restent identiques. Les coûts de transports par contre augmentent significativement de 17 119 à 20 665 soit +20 %.

Scénario	Probabilité (%)	Coûts		Démunis	% Démunis
		Transport	Entrepôt		
1	9	36 000	18360	1 500	9,7%
2	13	4 850	18360	-	0,0%
3	5	29 691	18360	195	1,4%
4	10	29 960	18360	-	0,0%
5	3	36 760	18360	1 580	10,9%
6	12	2 500	18360	-	0,0%
7	6	25 080	18360	180	1,7%
8	8	12 120	18360	-	0,0%
9	12	25 400	18360	-	0,0%
10	10	15 840	18360	-	0,0%
11	7	27 820	18360	-	0,0%
12	5	37 140	18360	-	0,0%
Espérance		20 665	18360	203	

Table IV-22 : Application numérique PSMS multi-scénarios – Synthèse des résultats.

Chapitre V.

APPLICATION AU CAS DE LA GESTION DES CATASTROPHES RECURRENTES AU PEROU.

Ce chapitre propose de confronter l'ensemble des propositions faites dans ce document au cas réel du Pérou. En effet, ce pays subit régulièrement les affres de la nature (inondations, tremblements de terre, vagues de froid, etc.) et se doit de disposer d'une Chaîne Logistique Humanitaire (CLH) efficientes et résilientes.

Concrètement, nous commencerons par présenter les caractéristiques du cas d'étude. Puis nous montrerons comment l'utilisation de nos premières contributions a permis de bâtir des scénarios réalistes de demande permettant d'alimenter utilement nos outils d'aide à la décision. La dernière section de ce chapitre s'intéressera à la conception d'un réseau logistique robuste pour le Pérou capable de répondre de manière satisfaisante aux crises récurrentes d'une part, mais également de servir de base aux réponses nécessaires en cas de crise exceptionnelle d'autre part.

1. Le Pérou.

1.1. Présentation générale.

Le Pérou est situé sur la côte centrale de l'ouest de l'Amérique du Sud. Il est bordé par l'océan Pacifique à l'Ouest, par le Chili au Sud, par la Bolivie et le Brésil à l'Est et par la Colombie et l'Équateur au Nord. Avec une superficie totale de 1 285 216 km². Le Pérou est le troisième pays d'Amérique du Sud par sa taille, après le Brésil et l'Argentine. Politiquement, il est divisé en 24 régions.

Schématiquement, on peut diviser le pays en trois zones naturelles avec des particularités géographiques et climatiques fortes :

- La Côte (*Costa*) est une étroite bande de 3080 kilomètres de long bordée par l'océan Pacifique. Le climat est sec et désertique. Ces déserts côtiers sont provoqués par la présence d'un courant froid, qui remonte la côte Pacifique en bloquant l'évaporation et la formation de perturbations pluvieuses. La Côte ne représente que 10,7 % du territoire du Pérou. Mais c'est la zone la plus peuplée, avec 19,5 millions d'habitants. On y trouve en particulier Lima, la capitale politique et financière du pays (9 millions d'habitants) ;
- La Montagne (*Sierra*) le long de la Cordillère des Andes, couvre 31,8 % du territoire. Le climat varie de tempéré à froid en fonction de l'altitude. On y trouve le point culminant du pays (6 768 mètres). C'est le foyer de 8,4 millions de personnes ;
- La Forêt amazonienne (*Selva*) est la plus grande région. Le climat y est tropical. Elle occupe 57,5 % du territoire du pays mais elle est très peu peuplée (environ 2,9 millions d'habitants).

Au Pérou il y a une grande variété climatique, physiographique et biologique ce qui le rend particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. Selon un rapport du Ministère de l'Environnement au Pérou, MINAM (2010), le pays est l'un des 10 pays au monde les plus diversifiés, avec :

- La deuxième plus grande forêt après l'Amazonie brésilienne ;
- La zone de montagne tropicale la plus haute ;
- 71 % des glaciers tropicaux ;
- 84 des 104 zones de vie identifiées dans la planète ;
- 27 des 32 climats du monde.

Cette hyper diversité est gravement menacée par le changement climatique et explique en grande partie la forte vulnérabilité du pays. Par son emplacement sur la planète, le Pérou devrait avoir un climat tropical, chaud et pluvieux, avec une végétation dense. Cependant, deux facteurs naturels interviennent pour que la frange occidentale du littoral du Pacifique soit un désert avec un climat tempéré toute l'année. Ces facteurs sont :

- L'existence de la Cordillère des Andes (dans la région occidentale du continent sud-américain), qui traverse le pays du sud au nord, en laissant deux franges : la côte désertique à l'occident et la forêt au côté oriental. La Cordillère agit comme un énorme mur qui empêche que les nuages de l'Atlantique arrivent sur la côte

péruvienne. La formation des Andes est associée à une forte activité sismique et d'autres phénomènes telluriques dans la région en raison de l'interaction de la plaque tectonique de Nazca avec la plaque Sud-Américaine (Castillo et Alva, 1993) ;

- L'existence d'un courant maritime d'eaux froides, appelé courant de Humboldt (ou la Péruvienne) qui parcourt du sud au nord l'Océan Pacifique très proche du littoral. Il maintient la température de la mer froide et rafraîchit la température atmosphérique. Les variations de ce courant sont à l'origine des phénomènes « *La Niña* » et « *El Niño* » discutés au Chapitre II.

Le pays est particulièrement menacé par les catastrophes naturelles :

- Les tremblements de terre associés à son emplacement sur la Ceinture du Pacifique ;
- Les inondations, glissements de terrain, vagues de chaleur dus au phénomène « *El Niño* » et vagues de froid dues au phénomène « *La Niña* » ;
- L'activité volcanique dans la partie sud du territoire entre les régions de Tacna, Moquegua, Arequipa et Ayacucho, où il y a plus de 20 volcans majeurs, dont certains sont actifs. Mentionnons toutefois qu'il n'y a pas eu d'éruption volcanique grave depuis 400 ans.

Au Pérou, les phénomènes naturels qui provoquent les plus grandes crises sont les séismes et les inondations (accompagnées parfois de glissements de terrain). D'autres phénomènes tels que les vagues de froid, les sécheresses, les tsunamis, les incendies de forêts ou les coulées de boue se produisent par moment. Mais ils ont un impact généralement mineur en termes de territoire touché, en nombre de victimes, en dommages et pertes économiques.

La Convention des Nations Unies sur les changements climatiques CCNUCC (1992) a retenu neuf facteurs caractérisant les pays auxquels il faut prêter attention suite à la modification du climat. Le Pérou en présente sept sur les neuf. De plus, ces facteurs se retrouvent sur une grande partie de son territoire.

Caractéristiques reconnues par la CCNUCC	Pérou
Pays de basse altitude et autres pays insulaires (P.19 et l'art. 4.8)	x
Pays ayant des zones côtières de basse altitude (P.19 et de l'art. 4.8)	√
Zones arides et semi-arides (P.19 y art. 4.8) : zones couvertes de forêts et zones exposées à la déforestation (art. 4.8)	√
Zones exposées aux inondations, à la sécheresse et à la désertification (P.19)	√
Pays ayant des zones sujettes à des catastrophes naturelles (art. 4.8)	√
Pays en développement ayant des écosystèmes montagneux fragiles (P.19) : Pays ayant des écosystèmes fragiles, y compris les écosystèmes montagneux (art. 4.8)	√
Pays ayant des zones de forte pollution de l'atmosphère urbaine (art. 4.8)	√
Pays dont l'économie dépend fortement des revenus générés par la production, la transformation et l'exportation de combustibles fossiles, des produits à forte consommation énergétique (art. 4.8).	√
Pays sans littoral et de transit (art. 4.8)	x

Table V-1 : Pérou, pays vulnérables aux effets négatifs du changement climatique.

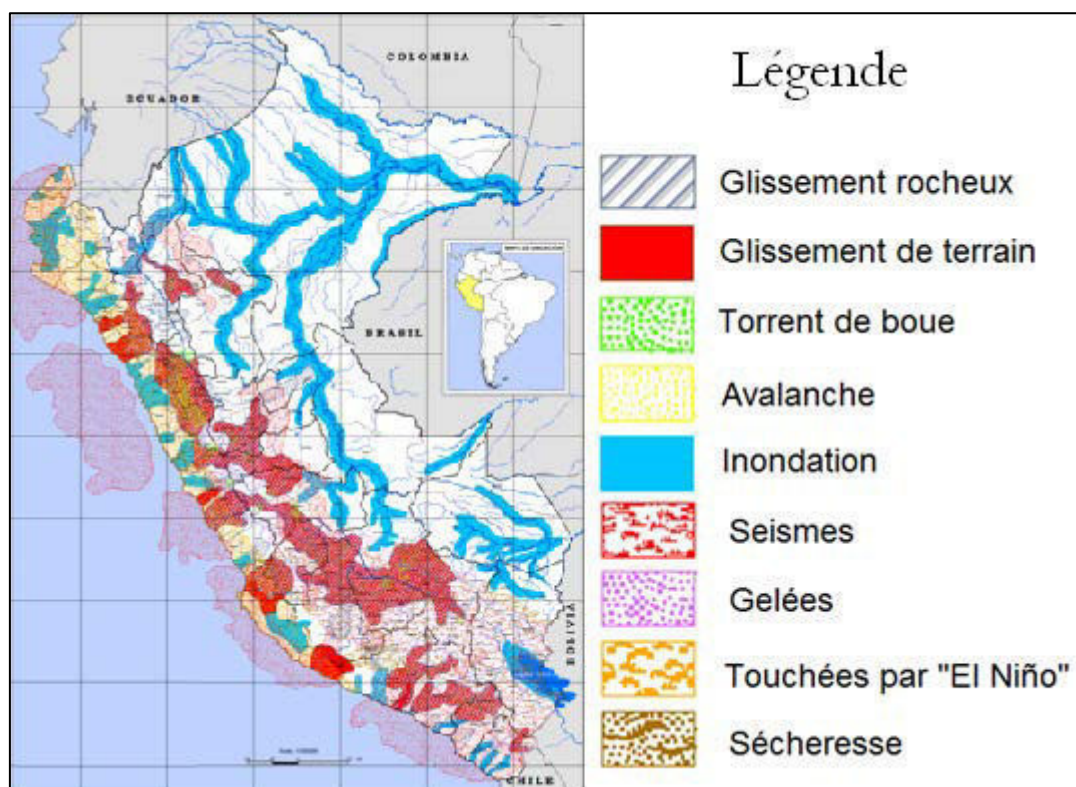


Figure V-1 : Les zones à risque du Pérou (Ministère Economie Pérou, 2003).

Source :

www.vivienda.gob.pe/pnc/documentos/Material_Divulgacion/Mapa_de_Peligros_Multiples.pdf

1.2. Le Pérou et les tremblements de terre.

Le Pérou et le Chili sont sur la Ceinture du Pacifique, plus précisément à la frontière de la plaque Amérique du Sud (plaque émergée) et de la plaque Nazca (plaque immergée). La plaque Nazca s'enfonce sous la plaque Amérique (phénomène dit de subduction). Cette subduction crée une fosse océanique le long de la côte et constitue la cause principale de l'élévation de la Cordillère des Andes par compression de la bordure occidentale de la plaque Sud-Américaine.

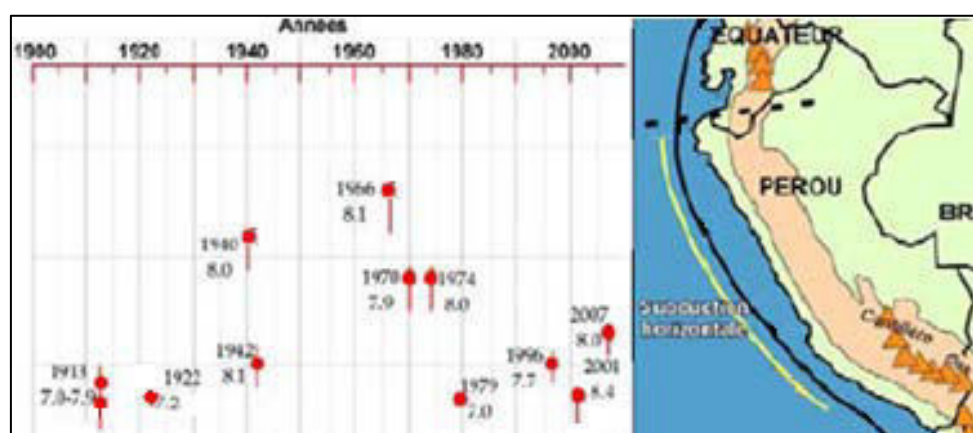


Figure V-2 : Les séismes de subduction historiques depuis 1900 au Pérou.

Source : Saillard (2008)

Ce phénomène géologique explique aussi la propagation des séismes. Par exemple, un tremblement de terre avec un épicentre à Lima affectera aussi les régions côtières frontalières d'Ancash et Ica, parce que la ligne de faille sismique suit la côte. Mais il n'affectera pas les régions de Pasco et Junín, elles aussi en bordure, mais situées derrière la Cordillère des Andes qui sert de mur d'amortissement des ondes sismiques. Entre 1582 et 2007, on a recensé au Pérou 37 tremblements de terre importants d'une magnitude comprise entre 6,0 et 7,9 et 10 tremblements de terre de magnitude supérieure ou égale à 8. L'essentiel de ces séismes a eu lieu dans les deux régions frontalières de Lima et Ica (70%), les autres étant sur la côte au centre-sud du pays.

No	Date	Magn.	Région	No	Date	Magn.	Région
1	22/01/1582	7,9	Arequipa	25	24/05/1940	8,2	Ancash
2	09/07/1586	8,1	Lima	26	24/08/1942	8,4	Ica (mar)
3	24/11/1604	8,4	Ica	27	30/09/1946	7,0	Ica (mar)
4	14/02/1619	7,8	La Libertad	28	10/11/1946	7,2	Ancash
5	31/05/1650	7,2	Cusco	29	01/11/1947	7,5	Junín
6	13/11/1655	7,4	Lima	30	28/05/1948	6,7	Lima
7	12/05/1664	7,8	Ica	31	21/05/1950	6,0	Apurímac
8	16/06/1678	7,0	Lima	32	01/03/1951	6,7	Arequipa
9	20/09/1687	8,2	Lima	33	12/12/1953	7,7	Tumbes
10	21/10/1687	7,0	Arequipa	34	21/07/1955	6,7	Ayacucho
11	22/01/1725	7,0	Lima	35	15/01/1958	7,3	Arequipa
12	28/09/1746	8,4	Lima	36	07/02/1959	7,2	Tumbes
13	13/05/1784	8,0	Arequipa	37	13/01/1960	7,5	Arequipa
14	07/12/1806	7,5	Lima	38	17/10/1966	8,1	Lima
15	10/07/1821	7,9	Arequipa	39	19/06/1968	6,9	Moyobamba
16	18/09/1833	7,0	Tacna	40	01/10/1969	6,4	Tacna
17	13/08/1868	8,6	Tacna	41	31/05/1970	7,9	Chimbote
18	09/05/1877	7,5	Tacna	42	03/10/1974	8,1	Lima
19	28/07/1913	7,0	Arequipa	43	23/06/2001	8,4	Arequipa
20	06/08/1913	7,7	Arequipa	44	07/07/2001	7,6	Arequipa
21	11/10/1922	7,4	Arequipa	45	26/09/2005	7,5	Moyobamba
22	09/04/1928	6,4	Madre de Dios	46	20/10/2006	6,7	Ica
23	14/05/1928	7,3	Amazonas	47	15/08/2007	8,0	Ica
24	18/07/1928	7,0	Cajamarca				

Table V-2 : Tremblements de terre les plus importants du Pérou 1582-2007.

Source : Silgado (1978), INDECI (2004) et USGS (2014).

Si on reporte ces données sur un graphique, il est possible de constater une certaine saisonnalité dans la survenue de ces grands tremblements de terre au Pérou.

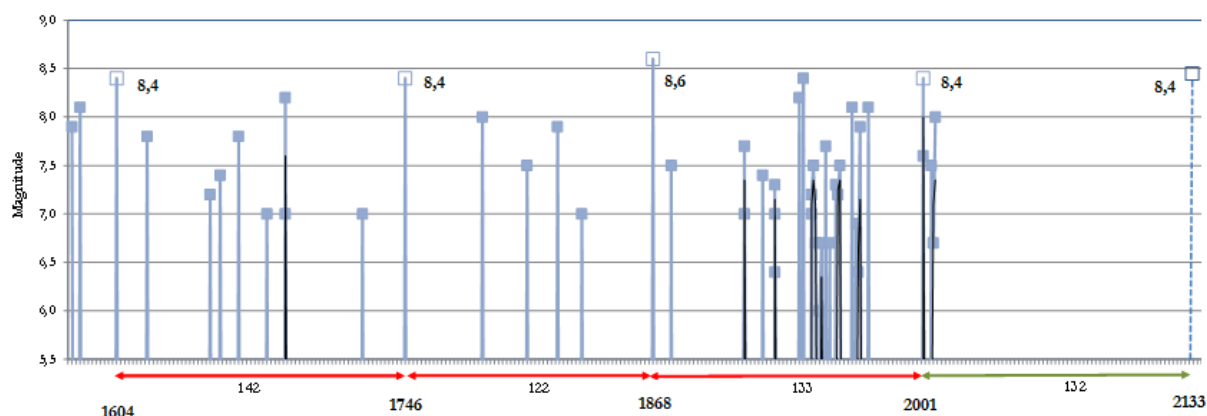


Figure V-3 : Nature cyclique des grands tremblements de terre au Pérou et prévision.

Sur le graphique on peut vérifier que les tremblements de terre de magnitude supérieure à 8 ont une fréquence relativement constante, avec une moyenne de 132 années entre deux apparitions (années 1604, 1746, 1868, 2001) et des intensités moyennes de 8,4 M (magnitudes 8,4 / 8,6 / 8,4 / 8,4 respectivement). Au premier abord ces événements passent pour exceptionnels. Mais en fait, ils ont une nature cyclique. Cette nature cyclique ne peut se détecter que si l'on dispose d'une base de données couvrant plusieurs cycles.

On prévoit en conséquence que le prochain tremblement de terre important au Pérou arrivera autour de l'année 2133 et que l'emplacement probable de son épicentre sera entre les régions de Lima et Ica.

Ces tremblements de terre de magnitude élevée ne constituent qu'une petite partie des séismes du Pérou. Peu ou prou, toutes les régions péruviennes subissent des séismes. Si on regarde ce qui s'est passé dans la région de Cusco (région située dans la Cordillère et loin du littoral), il y a eu 14 tremblements de terre significatifs entre 1970 et 2007. Sur une analyse des fréquences, on peut voir que dans cette région, 7 % des tremblements de terre recensés ont une magnitude supérieure à 5,5.

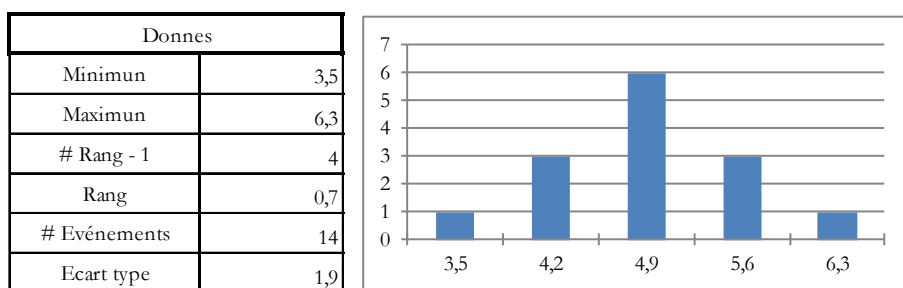


Figure V-4 : Distribution de fréquence des tremblements de terre.

La base de données de l'Institut de Géophysique du Pérou, l'IGP (site <http://www.igp.gob.pe>) contient 2200 tremblements de terre, enregistrés sur une période de collecte allant du 05/01/1970 au 31/12/2007. Cette base enregistre les relevés sismiques d'un réseau de sismographes répartis à travers le pays. Pour les experts péruviens en sismologie, cette base de données est considérée comme la plus fiable. La table suivante donne un aperçu de cette base.

Record No.	Date yyyy/mm/dd	Heure UTC	Lat. °S	Lon. °O	Depth km	Magnitudes				Intensité maximale MM/MSK
						mb	ML	Ms	Mw	
1	1970/01/05	06:58:58.3	-17,310	-70,930	118	4,9				III Characato
2	1970/01/14	23:49:05.6	-16,690	-72,000	96	3,9				III Characato
3	1970/02/14	11:17:16.5	-9,912	-75,542	27	5,8				VIII Quero
[...]										
2273	2007/12/25	16:20:57.0	-19,619	-70,455	109		5,5		5,8	IV Tacna
2274	2007/12/31	04:55:32.7	-7,364	-79,889	53		4,0			II San Pedro de Lloc
2275	2007/12/31	10:39:40.6	-15,065	-75,900	27	5,1	4,8		5,2	III San Juan de Marcona
2276	2007/12/31	10:58:58.7	-15,066	-75,787	14	5,0	4,7			III San Juan de Marcona

Table V-3 : Extrait de tremblements de terre historiques dossiers dès 1970 à 2007.

Comme on peut le remarquer, selon les enregistrements, cette base utilise plusieurs mesures de magnitude. Pour mesurer l'intensité des tremblements de terre, au fil du temps, différents systèmes d'échelle, ont été utilisés comme la magnitude locale ML dite aussi de Richter, la mesure de l'amplitude de l'onde MS, la magnitude des ondes de volume Mb ou magnitude de moment MW appelé aussi Richter Modifié (Hanks et Kanamori, 1979). Cette dernière est la magnitude la plus utilisée aujourd'hui. C'est la mesure standard officielle utilisée par l'Enquête Géologique aux Etats Unis, *The United States Geological Survey* (USGS, 2002). Heureusement, il existe des formules d'équivalence entre ces échelles, qui permettent la transformation des données (McCalpin, 2009).

Sur les 2200 séismes, environ 20% sont au-dessus de 5,5 Mb et donne lieu au déclenchement d'aide humanitaire. En dessous de cette magnitude, on a des mouvements sismiques sans incidence importante. Ceci a été vérifié pour toutes les régions en étudiant les dossiers historiques constituant le « Compendium des Statistiques du Pérou ». La carte ci-après synthétise les intensités sismiques maximales enregistrées dans le pays. Cette carte a été réalisée dans le cadre des travaux menés par le Centre Péruviano-Japonais pour la Recherche sur les Tremblements de Terre et l'Atténuation des Catastrophes (*El Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres*, CISMID).

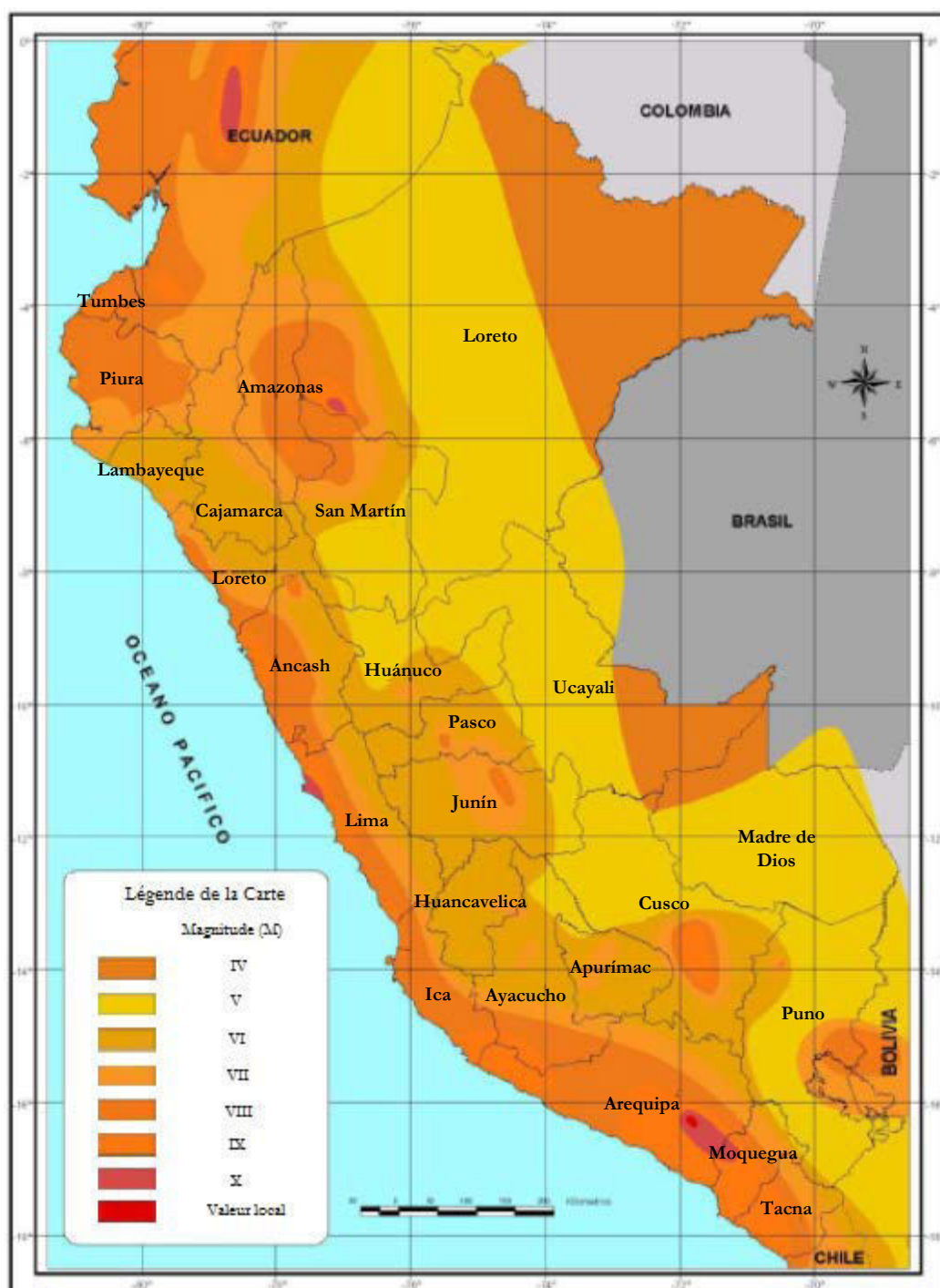


Figure V-5 : Carte de la distribution d'intensité sismique maximale.

Source : Alva et al. (1993).

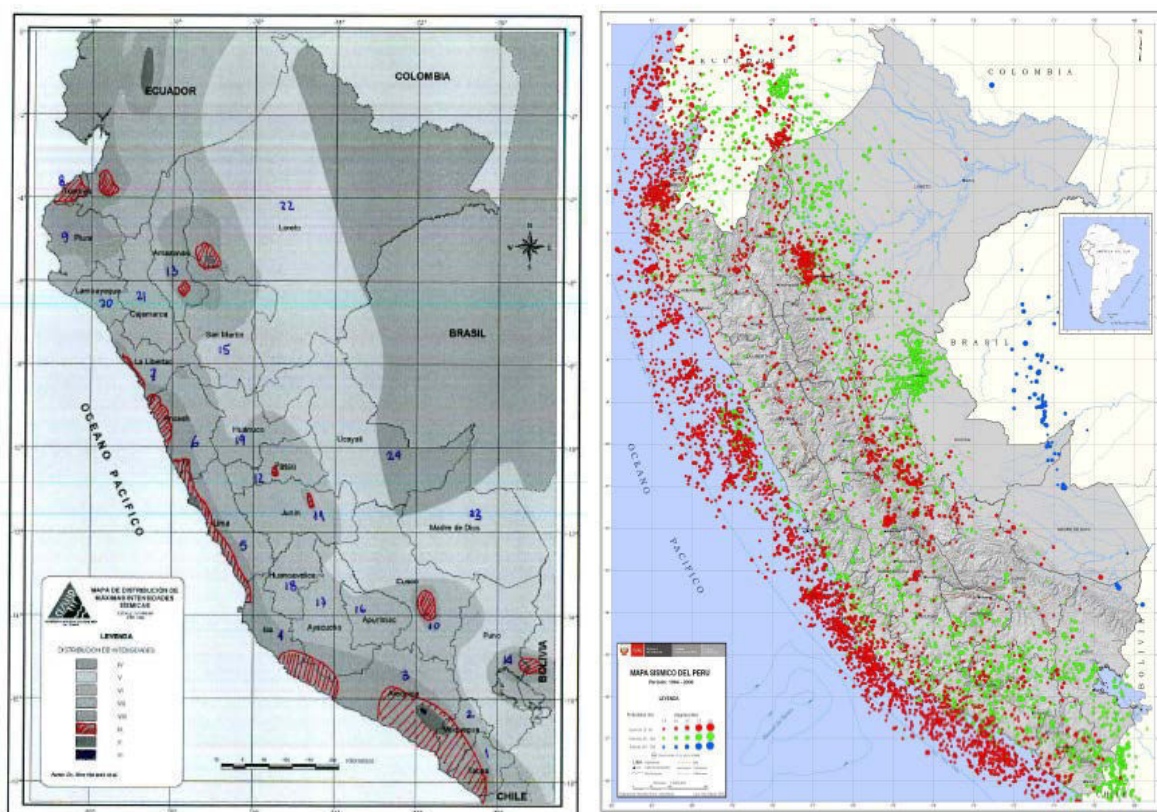


Figure V-6 : Cartes sur les séismes au Pérou.

Sources : CISMID (à gauche, les zones géologiques plus vulnérables) et IGP (à droite, les enregistrements de secousses sismiques.).

1.3. Le Pérou et « El Niño »

Les fortes pluies diluviennes et les orages provoquent régulièrement des inondations et des glissements de terrain au Pérou, mais aussi en Bolivie et au Chili. A titre d'illustration sur ces dernières années :

- En 2009, les pluies ont provoqué des glissements de terrain dans la région d'Arequipa, dans le sud du Pérou. D'autres glissements de terrain ont provoqué la coupure de nombreuses routes et isolé le district de Quicacha du reste du pays. De nombreuses rivières étaient en crue ;
- En 2011 l'état d'urgence a été déclaré en Bolivie et au Pérou en raison des pluies diluviennes. Les pluies ont laissé des milliers de sans-abri et provoqué des dommages matériels importants ;
- En 2014, au Pérou, les pluies ont fait plusieurs milliers de sans-abri. De gros dégâts ont été causés aux infrastructures : au moins 15 ponts ont été détruits et plus de 300 kilomètres de routes ont été endommagés. La rivière traversant la ville d'Arequipa a débordé et inondé la ville faisant pour 100 millions de dollars de dégâts.

Nous avons dit au début de cette présentation que le climat de la côte était désertique. Il peut paraître paradoxal de parler des dommages dus aux précipitations abondantes. En temps normal, dans l'océan Pacifique, les alizés, chargés en vapeur d'eau, engendrent d'abondantes précipitations sur l'Indonésie (jusqu'à 7 mm par heure de précipitations par an), alors que de l'autre côté du

Pacifique, dans les Andes et les hauts plateaux du Pérou sévit la sécheresse. Cependant, il arrive que le trajet des alizés se modifie entre janvier et mars. Les cumulo-nimbus s'installent alors au large de l'Amérique Latine. D'importantes précipitations s'abattent sur la côte Ouest du Pérou. Ce phénomène climatique est causé par le réchauffement accentué des eaux de surface près des côtes de l'Amérique du Sud. Il porte aujourd'hui le nom « *El Niño* » (le petit garçon, en espagnol, et par extension « l'Enfant Jésus », en rapport à la période de l'année où le phénomène est le plus marqué : Noël). Les événements « *El Niño* » apparaissent normalement d'une manière irrégulière, tous les 2 à 7 ans mais semblent beaucoup plus fréquents depuis le début des années 1990 (tous les 2 à 3 ans). Ces épisodes débutent en général en milieu d'année et durent de 6 à 18 mois. Ils atteignent leur intensité maximale vers Noël. La phase qui fait suite à « *El Niño* » est nommée « *La Niña* » (soit petite fille en espagnol). Elle est caractérisée par un refroidissement des eaux de surface et entraîne souvent des vagues de froid assez importantes.

1.4. Mise en place de l'aide

Les tremblements de terre et les inondations constituent un groupe de catastrophes naturelles récurrentes au Pérou. Pour aider les victimes, le gouvernement a mis en place des entrepôts de stockage d'aide. Le réseau péruvien actuel est composé d'un entrepôt national et de douze entrepôts régionaux. La majorité des stocks de secours se trouve actuellement dans la région de Lima, qui est probablement la plus sensible en raison de la concentration de la population. Mais si un tremblement de terre de forte intensité se produit dans cette région, il y a des risques qu'une partie de ces stocks soient rendue inutilisable et que la réponse ne soit pas aussi efficace que prévue.

Une partie de cette aide est constituée de produits non périssables. Voici une description des « Kits » de secours proposés par INDECI (2011) pour une famille ayant tout perdu.

Famille	Personne
(Les articles sont livrés pour chaque famille)	(Les articles sont livrés pour chaque personne)
01 Modulo ou Tente	01 Lit ou Matelas
15 Tôles ondulées en acier ¹	01 Couettes ou Couverture
10 Panneaux de contreplaqués ¹	01 Moustiquaire (forêt ou Sierra)
10 m de plastique ¹	01 Vaisselle (assiette, tasse, cuillère)
01 cuisine avec 02 brûleurs	01 nourriture froide journalière
02 Pots No. 024	Autre selon les besoins
01 Réservoir pour eau 140 litres	
01 Saut	
0,2 Paquet des vêtements par personne	
01 Louche	
01 Couteau	
¹ Livraison en multiples de.	

Table V-4 : Kit des secours selon le bénéficiaire.

Secours : INDECI (2011).

Pour Coppola (2007), l'aide alimentaire doit répondre aux besoins de la population ciblée. La nourriture doit rester proche de l'alimentation habituelle, en utilisant des ingrédients identiques ou similaires à ceux que les gens consomment dans la vie courante et de préférence de provenance locale. Les populations ayant des besoins spéciaux, tels que les malades, les enfants, les femmes enceintes ou allaitant, les personnes âgées doivent voir leurs besoins nutritionnels couverts. Le matériel utilisé pour le transport, le stockage, la cuisson doit être adapté.

Pour Socarrás et Bolet (2010), les estimations en besoins nutritionnels doivent être faites sur la base d'informations spécifiques de la zone en crise, incluant notamment :

- La structure démographique de la population (âge et sexe) ;
- L'emplacement et la disponibilité de la nourriture ;
- Les groupes à risque : malades, femmes enceintes, nourrissons, jeunes enfants, personnes âgées et handicapées ;
- L'état de santé et l'état nutritionnel de la population : maladie gastro-intestinale, taux de sous alimentés, etc. Les besoins devraient augmenter si la population est sous-alimentée.

Lorsque les conditions de survie reposent pendant plusieurs semaines ou même plusieurs mois exclusivement ou presque exclusivement sur les rations d'aide alimentaire, ces rations devraient fournir de 1 700 - 2 000 kcal par personne et par jour (PAHO, 2005). La valeur énergétique doit être de 5 à 10 % par des protéines, pour environ 30 % par des matières grasses et pour 65 % par des glucides (Socarrás et Bolet, 2010). Ils recommandent la quantité ci-dessous en fonction de l'âge, du sexe.

Catégorie	Substance en cas de crises (Kcal)	Conservation temporal (Kcal)
0 à 2 ans	1 000	1 000
3 à 5 ans	1 250	1 500
6 à 9 ans	1 500	1 750
10 à 17 ans	2 000	2 500
Grossesse et la lactation	2 000	2 500
Homme adulte	1 900	2 200
Femme adulte	1 600	1 800

Table V-5 : Alimentation recommandée en cas de crises.

Source: Socarrás y Bolet (2010).

L'eau constitue un élément critique pour la survie dans les situations de crise (TPS, 2011). On doit s'intéresser en priorité à son traitement et sa distribution par exemple :

- Identifier les sources d'eau disponibles dont la qualité pour le consommateur a été vérifiée ;
- Identifier la vulnérabilité des routes par lesquels les camions fournisseurs peuvent se déplacer ;
- Identifier les zones prioritaires à alimenter (hôpitaux, camp de réfugiés, etc.).

TPS (2011) recommande de fournir de 7,5 à 15 litres d'eau par personne et par jour. Cette eau doit assurer divers usages :

Usage	Quantité (Litres)
La boisson	2,5 – 3,0
Les pratiques fondamentales d'hygiène	2,0 – 6,0
Pour faire la cuisine	3,0 – 6,0

Table V-6 : Besoins élémentaires d'eau pour doit assurer la survie.

Source: TPS (2011)

TPS (2011) donne aussi le nombre maximum de personnes selon la source d'eau.

Nombre de personnes par source	Le débit de la source d'eau (L/minutes)
250 par robinet	7,5
500 par pompe d'eau manuelle	17,0
400 pour chaque puits ouvert	12,5

Table V-7 : Nombre maximum de personnes par source d'eau.

Source: TPS (2011)

Le contexte général du cas application étant désormais planté, nous allons désormais nous intéresser à la mise en œuvre des contributions développées dans les chapitres précédents au cas particulier du Pérou.

2. Modèle de prévision de la demande.

2.1. Etape 1 : Identification des facteurs d'influence.

La première étape consiste à identifier les facteurs qui permettent de qualifier le niveau de vulnérabilité et de résilience d'une région touchée par une catastrophe potentielle. Comme on l'a vu au chapitre 3, à travers la littérature, nous avons identifié 89 facteurs génériques pour caractériser la vulnérabilité et la résilience. Il s'agit notamment des indicateurs sur la démographie, l'économie, l'environnement, la santé et l'accessibilité. Parmi les 89 facteurs listés, seuls 58 sont quantitatifs. Certains de ces indicateurs ne peuvent pas être appliqués à tous les types de catastrophes naturelles. Par exemple, certains d'entre eux peuvent être retenus pour les tremblements de terre, les inondations, les éruptions volcaniques, etc. mais pas pour les maladies, les actes terroristes, etc.

Une partie de ces facteurs est difficile à renseigner, soit parce qu'ils sont qualitatifs, soit parce que les données nécessaires ne se trouvent pas dans des bases de données existantes.

Dans un premier temps, nous avons travaillé avec un groupe d'experts de la gestion de crise à Lima pour faire une présélection basée sur l'apport de chaque facteur et la possibilité de collecte de l'information. Il en est ressorti 12. Ces facteurs sont :

- La taille de la population (en millions) ;
- L'Indice de Développement Humain (ratio IDH) ;
- Le taux de logement raccordé aux réseaux publics d'eau (%) ;
- Le taux de logement raccordé au réseau électrique (%) ;
- Le taux d'habitation précaire (%) ;
- L'espérance de vie à la naissance (ans) ;
- Le taux d'alphabétisation (%) ;
- Le taux de personnes ayant suivi des études secondaires (% d'une génération inscrit dans des études secondaires) ;
- Le taux de réussite éducatif (% d'une génération ayant validé un diplôme du secondaire) ;
- Le revenu moyen par personne et par jour (*Nuevos Soles*) ;
- Le taux d'insécurité (nombre de plaintes / mille habitants)
- Le taux de qualité de l'aide apportée (montant des aides sociales / million d'habitants).

Arrêtons-nous un instant sur deux indices particulièrement représentatifs : « IDH » et « taux d'habitation précaires ».

2.1.1. Indice de Développement Humain (IDH).

Jusqu'en 1990, pour évaluer le niveau de développement d'un pays, on se limitait à observer ses performances économiques et à mesurer la production de richesse de ses agents économiques : typiquement le produit intérieur brut par habitant ou PIB. L'évaluation du niveau de développement ne peut se limiter aux seules performances économiques. De multiples facettes

du développement doivent aussi être étudiées, comme les domaines sociaux (santé, éducation, logement, emploi...), la pauvreté, les inégalités. L'IDH est un indicateur synthétique du niveau de développement des pays, dont la construction a été inspirée par les travaux d'Amartya Sen, prix Nobel d'économie en 1998. Outre la richesse monétaire, l'IDH prend en compte deux autres aspects essentiels du développement humain : la santé et l'éducation. L'IDH est construit à partir de quatre indices :

- L'indice de santé : l'espérance de vie à la naissance ;
- L'indice de scolarisation des jeunes : le rapport du nombre des « jeunes » scolarisés sur la population des « jeunes » en âge d'être scolarisés. Pour le PNUD, le nombre de jeunes scolarisés est le nombre d'individus inscrits au niveau primaire (excepté en maternelle), secondaire et tertiaire (supérieur), quels que soient leurs âges ;
- L'indice d'alphabétisation des adultes : « Le pourcentage des personnes âgées de 15 ans ou plus qui peuvent, en le comprenant, lire et écrire un texte court en rapport avec leur vie de tous les jours » ;
- L'indice de richesse monétaire : l'indice de richesse monétaire calculé par le PNUD est basé sur le produit intérieur brut (PIB) par habitant en dollar parité de pouvoir d'achat (PPA), une unité commune qui permet la comparaison des pays, notamment en corrigeant les PIB par habitant pour la différence des niveaux des prix entre les pays (donc pour la différence de pouvoir d'achat d'un dollar entre les pays).

2.1.2. Taux d'Habitations Précaires.

Le Centre d'Etudes et de la Prévention des Catastrophes, Predes (*Centro de Estudios y Prevención de Desastres*) du Pérou a défini les paramètres qui permettent de déterminer le niveau de vulnérabilité des bâtiments dans une région ou un district donné :

- La densité de population : élevée (plus de 450 habitants/ha), moyenne haute (350-450 habitants/ha), moyen basse (250-350 habitants/ha), faible (150-250 habitants/ha) et très faible (70-150 habitants/ha) ;
- Les matériaux de construction prédominants : on considère par exemple que les matériaux de construction prédominants à Lima sont la brique/béton, l'argile, le bois et le chaume ;
- Le type de bien : maison indépendante, immeuble d'appartements, logement de quartier, logements précaires normalement non destinés à l'habitat humain ;
- Etat de la propriété : délabrée, en consolidation, densifiée et consolidée ;
- Hauteur de logements.

Par la suite, nous avons dû écarter les données associées au taux de qualité de l'aide apportée parce qu'elles étaient incomplètes dans les enregistrements de l'INDECI.

Finalement, nous avons pu renseigner les valeurs des 11 facteurs restant pour chacune des 24 régions du Pérou sur quatre années : 1993, 1995, 2000 et 2007. Ces valeurs ont été recueillies à partir de bases de données gouvernementales publiques, d'organisations nationales telles que l'Institut National de Statistique et d'Informatique (INEI) et le Ministère Péruvien de l'Education

(MINEDU) et de bases de données d'ONGs locales. Le tableau suivant présente ces valeurs sur les années 1993, 2000 et 2007¹.

Region	Vulnerability indexes																		Resilience indexes																	
	Population			IDH			Eau ²			Electricité			Vulnérables murs ³			Espérance de vie à la naissance			Analphabétisme			Secondary registration			Réussite éducatif			Revenu per cápita par famille			Dossiers criminels			Soutien logistique		
	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007
	quantity (mil)			ratio			%			%			%			years			%			%			S/. mes			quantity (mil)			(S/. million)					
Amazonas	354,2	406,1	376,0	0,47	0,51	0,57	32%	48%	43%	18%	50%	48%	71%	67%	63%	63,4	68,2	72,4	79,5	82,9	88,0	40,8	51,5	78,6	66,6	72,4	84,9	65,8	195,37	204,7	5,23	6,40	0,81	0,0	1,6	0,3
Ancash	983,7	1067,3	1063,5	0,53	0,58	0,60	49%	61%	72%	45%	65%	73%	69%	68%	59%	66,8	67,9	72,3	78,1	80,8	87,6	65,1	75,1	86,3	73,8	78,9	87,2	87,9	307,27	320,8	7,88	8,20	4,50	0,0	0,0	0,4
Apurímac	396,1	426,9	404,2	0,40	0,46	0,56	29%	56%	54%	20%	61%	69%	97%	94%	91%	59,1	64,3	71,8	63,0	70,4	78,3	43,9	63,7	89,9	56,6	68,2	82,2	52,0	137,49	203,3	1,63	1,56	1,13	0,0	0,0	2,3
Arequipa	939,1	1073,0	1152,3	0,65	0,64	0,65	74%	69%	80%	70%	73%	84%	23%	19%	14%	66,8	68,7	73,5	92,0	93,6	95,9	82,7	92,4	90,7	88,9	93,2	94,2	149,9	331,33	434,8	16,32	11,07	9,19	0,0	1,6	1,6
Ayacucho	512,4	527,5	527,5	0,42	0,49	0,49	45%	61%	61%	26%	65%	65%	84%	68%	68%	59,4	66,0	66,0	67,2	71,7	71,7	46,9	69,8	69,8	60,4	71,1	71,1	62,9	167,91	167,9	2,26	3,90	2,19	0,0	0,0	0,0
Cajamarca	1297,8	1411,9	1387,8	0,45	0,49	0,56	26%	66%	58%	17%	31%	40%	91%	88%	84%	63,4	66,6	72,1	72,7	77,8	82,9	41,3	51,6	79,6	62,2	69,1	81,8	62,9	198,44	215,7	2,25	3,89	2,29	0,0	0,0	2,9
Cusco	1066,5	1158,1	1171,4	0,48	0,54	0,58	44%	69%	64%	42%	73%	64%	89%	85%	81%	58,5	64,9	70,8	73,8	83,3	86,1	54,5	65,4	87,6	67,3	77,3	86,6	98,6	259,75	262,5	11,57	4,62	4,07	0,0	2,1	2,3
Huancavelica	400,4	431,1	454,8	0,37	0,46	0,54	28%	46%	34%	19%	65%	56%	96%	95%	94%	54,3	64,2	70,0	65,7	72,5	79,9	45,9	61,2	86,7	59,1	68,7	82,2	42,0	142,06	131,9	0,75	2,00	0,02	0,0	0,0	0,0
Huánuco	677,9	776,7	762,2	0,45	0,49	0,57	29%	61%	39%	25%	65%	43%	73%	68%	64%	62,3	66,2	71,5	75,0	77,4	83,4	41,4	55,4	81,7	63,8	70,1	82,8	60,5	191,82	231,6	3,85	4,08	0,99	0,0	0,0	0,3
Ica	578,8	649,3	711,9	0,64	0,67	0,65	74%	61%	77%	75%	65%	76%	65%	68%	33%	68,5	72,0	75,9	94,2	95,7	97,2	87,8	93,4	89,7	92,0	94,9	94,7	125,2	357,79	371,9	7,48	5,77	2,55	0,0	0,0	13,0
Junín	1093,0	1190,5	1225,5	0,54	0,58	0,60	57%	61%	61%	58%	65%	73%	66%	68%	48%	63,4	67,2	71,8	86,3	88,1	92,4	70,2	85,8	86,2	80,9	87,3	90,4	91,4	253,06	278,1	11,86	2,87	1,71	0,0	0,0	2,7
La Libertad	1287,4	1466,0	1617,1	0,58	0,61	0,62	60%	74%	65%	55%	56%	72%	75%	60%	63%	68,3	69,7	73,5	86,2	89,0	91,9	66,0	71,8	82,0	79,5	83,3	88,6	101,3	338,24	381,3	14,81	10,78	9,76	0,0	0,0	0,3
Lambayeque	950,8	1093,1	1112,9	0,59	0,63	0,62	67%	74%	70%	66%	56%	76%	68%	60%	53%	68,8	71,2	73,5	88,7	89,5	93,5	70,7	75,1	85,3	82,7	84,7	90,8	103,2	343,20	318,4	9,86	9,95	8,47	0,0	0,0	0,6
Lima - Callao	7126,5	8239,9	8482,6	0,68	0,74	0,68	82%	70%	82%	82%	82%	93%	14%	11%	8%	65,1	73,3	76,1	87,1	96,2	98,2	77,7	94,6	89,2	84,0	95,7	95,2	189,7	547,47	552,1	145,90	19,90	67,83	0,0	4,5	2,9
Loreto	736,2	880,5	891,7	0,53	0,56	0,59	36%	48%	37%	48%	50%	61%	2%	2%	1%	62,8	67,3	70,3	88,8	92,0	94,5	47,3	60,5	79,2	75,0	81,5	89,4	99,4	265,28	279,1	6,36	2,90	3,49	0,0	1,8	0,7
Madre de Dios	69,9	84,4	109,6	0,60	0,62	0,63	39%	69%	66%	49%	73%	68%	3%	2%	1%	65,5	68,9	71,6	92,0	92,7	96,8	61,5	85,7	83,3	81,8	90,4	92,3	127,6	327,47	429,8	1,99	5,95	1,39	0,0	0,0	0,2
Moquegua	130,2	147,4	161,5	0,62	0,67	0,65	72%	69%	77%	62%	73%	80%	48%	40%	32%	66,9	69,9	75,1	91,0	92,6	95,3	85,6	91,0	91,1	89,2	92,1	93,9	121,0	412,72	418,2	1,85	5,21	1,44	0,0	0,0	0,6
Pasco	239,2	247,9	280,4	0,52	0,57	0,59	51%	46%	38%	46%	65%	69%	55%	52%	48%	62,5	66,7	71,9	84,6	89,1	91,7	70,5	89,4	85,0	79,9	89,2	89,5	81,2	233,75	222,4	1,12	4,61	0,33	0,0	0,0	0,1
Piura	1409,3	1545,8	1676,3	0,53	0,55	0,60	58%	74%	64%	41%	56%	66%	53%	51%	49%	63,3	68,6	71,7	83,2	86,9	90,8	59,2	70,0	82,4	75,2	81,3	88,0	100,6	209,18	313,8	10,74	5,17	5,52	0,0	2,5	0,6
Puno	1103,7	1199,4	1268,4	0,45	0,51	0,56	26%	56%	40%	20%	53%	57%	87%	81%	74%	58,0	64,0	68,6	77,6	79,5	87,8	65,3	82,4	86,5	73,5	80,5	87,3	55,5	179,72	208,8	7,92	0,83	1,61	0,0	1,6	4,1
San Martín	572,4	743,7	728,8	0,54	0,55	0,59	35%	48%	53%	37%	50%	59%	55%	45%	35%	66,2	70,0	72,4	87,1	89,6	92,3	46,1	56,3	77,7	73,5	78,5	87,4	93,6	220,57	255,4	2,86	2,78	1,34	0,0	1,6	1,3
Tarma	223,8	277,2	288,8	0,71	0,68	0,65	81%	77%	73%	74%	73%	82%	25%	19%	13%	70,4	73,4	74,2	92,5	93,0	96,3	77,3	83,9	89,7	87,4	90,0	94,1	193,8	420,45	410,4	7,06	8,52	1,08	0,0	0,8	0,4
Tumbes	158,6	193,8	200,3	0,61	0,62	0,65	69%	74%	73%	70%	56%	81%	59%	60%	47%	65,7	69,7	75,2	93,3	93,4	96,6	73,4	82,5	85,4	86,7	89,8	92,9	124,9	311,84	412,8	3,92	7,29	1,53	0,0	0,0	0,2
Ucayali	331,8	424,4	432,2	0,53	0,57	0,60	28%	48%	42%	48%	50%	65%	3%	2%	1%	62,0	65,8	71,2	89,9	90,9	95,2	54,1	76,5	80,2	78,0	86,1	90,2	91,2	257,43	313,4	3,39	6,98	2,86	0,0	0,9	0,4

Table V-8 : Données sur la vulnérabilité et la résilience pour les 24 régions du Pérou.

¹ Les valeurs des années 1993 et 1995 étant très proches, nous ne présentons ici que celles de l'année 1993 pour ne pas surcharger inutilement la lecture du tableau.

² Services d'approvisionnement en continu, y compris: réseau public dans le logement, le réseau public en dehors de la maison, bassin publique.

³ Il est compris ces maisons dont les murs sont en pisé, chaume ou de la boue.

2.2. Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.

Conformément à notre méthodologie (chapitre 3), nous avons réalisé une ACP sur l'ensemble des données, sur les valeurs des années 1993, 2000 et 2007 des 11 facteurs retenus, pour la vulnérabilité et la résilience.

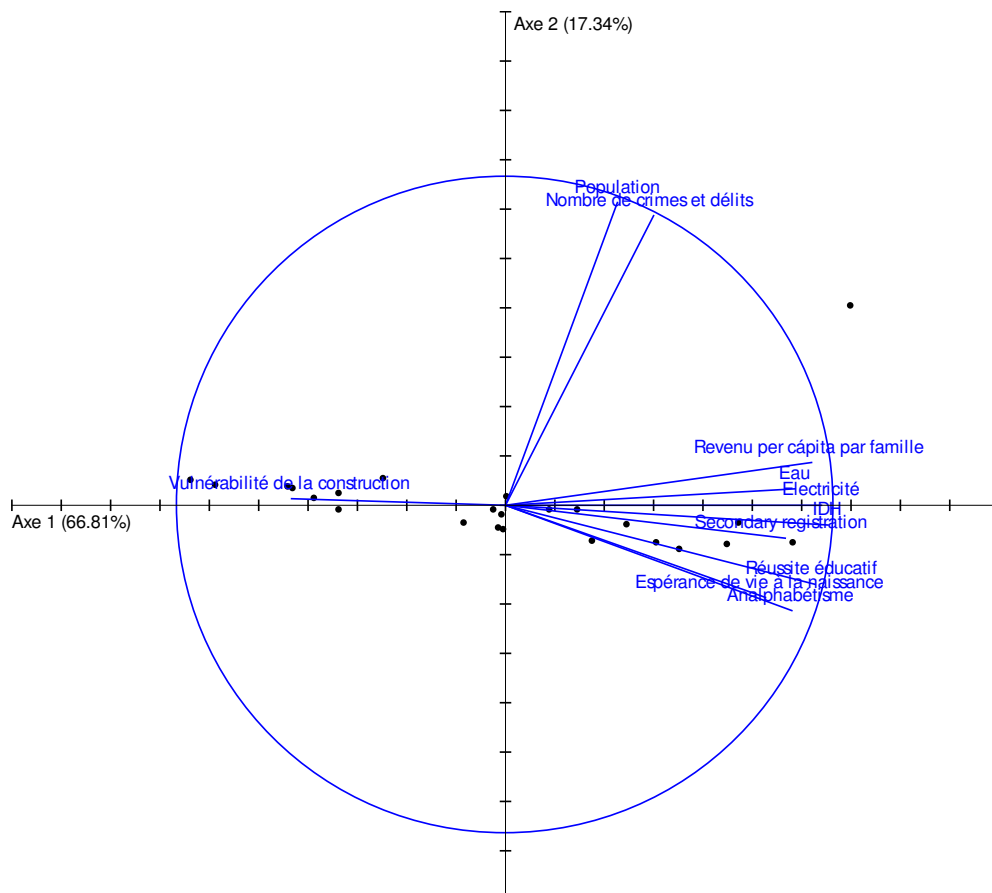


Figure V-7 : Résultat de l'ACP réalisée.

Cette analyse de données a permis d'identifier des corrélations entre les 11 facteurs que nous avons retenus comme représentatifs. Suite à cette première ACP, quatre facteurs peuvent être retenus comme variables discriminantes :

- L'Indice de Développement Humain (IDH) ;
- Le taux d'habitation précaires (ou Vulnérabilité des Constructions, VCS) ;
- Le taux de personnes inscrites dans des études secondaires (ou Taux d'Etudes Secondaires, TES) ;
- Le taux d'insécurité (ou Nombre de Crimes et Délits, NCD).

Remarquons que ces variables conservent 84,15 % de la variance des données. Ces résultats peuvent être considérés comme significatifs et le plan factoriel résultant peut donc être interprété. Ces corrélations étaient en partie attendues. L'Indice de Développement Humain (IDH) notamment est de par sa construction corrélé avec les indices d'espérance de vie à la naissance et d'analphabétisme. Il est de plus corrélé à l'accessibilité à l'eau et à l'électricité, la réussite éducative et le revenu *per capita* par famille. Ils ont un $R \geq 0,85$.

	Population	IDH	Eau	Electricité	(VDC)	(EV)	(AN)	(SR)	(RE)	(RC)	(NCD)
Population	1,00										
IDH	0,29	1,00									
Eau	0,33	0,86	1,00								
Electricité	0,32	0,94	0,90	1,00							
Vulnérabilité de la const. (VDC)	-0,19	-0,65	-0,33	-0,58	1,00						
Espérance de vie (EV)	0,06	0,85	0,70	0,73	-0,44	1,00					
Analphabétisme (AN)	0,04	0,88	0,83	0,82	-0,73	0,77	1,00				
Secondary registration (SR)	0,20	0,82	0,87	0,86	-0,33	0,60	0,70	1,00			
Réussite éducatif (RE)	0,12	0,93	0,80	0,91	-0,60	0,76	0,94	0,90	1,00		
Revenu per capita (RC)	0,42	0,94	0,83	0,89	-0,68	0,70	0,74	0,71	0,79	1,00	
Nombre de crimes et délits (NCD)	0,98	0,40	0,42	0,43	-0,31	0,12	0,14	0,29	0,23	0,53	1,00

Table V-9 : Corrélations entre les facteurs discriminants de la vulnérabilité et résilience.

Sur la base de ces quatre variables discriminantes, nous avons fait une deuxième analyse utilisant l'ACP, où les facteurs choisis représentent 81,01 % de la variabilité, comme le montre la figure suivante :

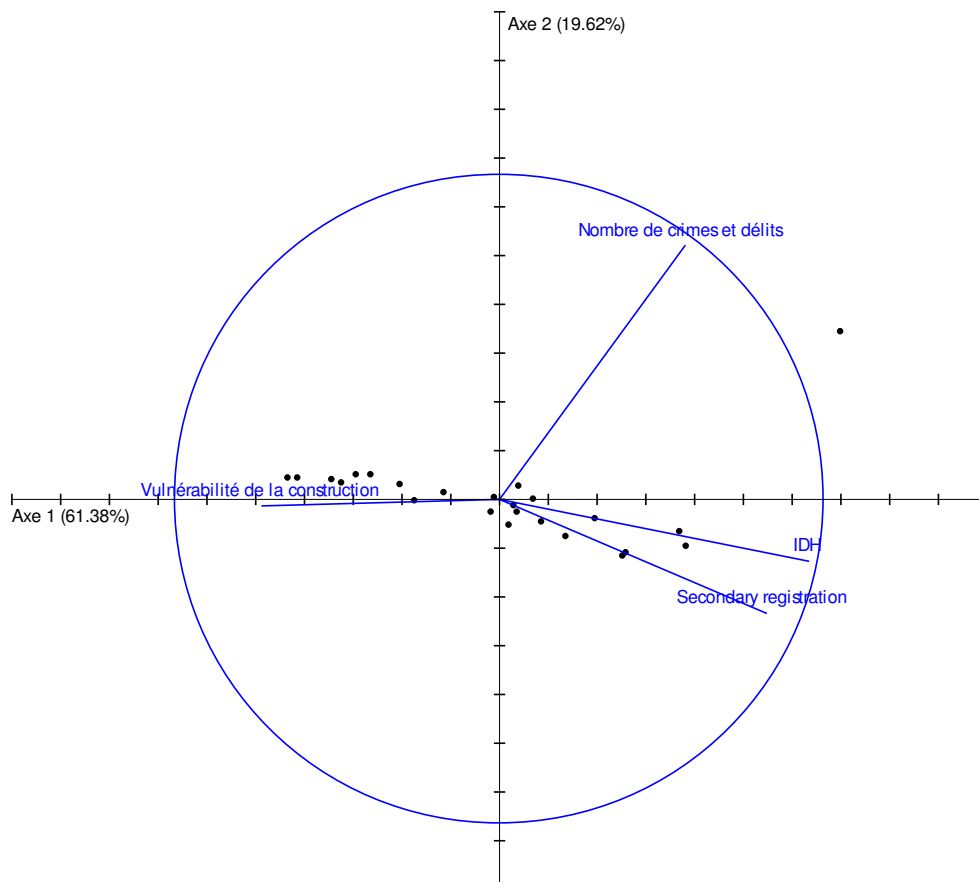


Figure V-8 : Résultat de l'ACP intermédiaire sur les 4 facteurs discriminants.

Les points IDH et taux d'études secondaires dans la population sont très proches car ces 2 facteurs sont très corrélés. Ces deux points sont très proches du cercle ce qui signifie que les 2 facteurs sont très bien représentés. De plus les données de la région de Lima sont en dehors du cercle. Un éloignement des facteurs du cercle montre que ces facteurs sont plutôt mal représentés. C'est pourquoi, nous avons décidé de retirer les données de la région Lima et du taux d'études secondaires. A la suite de quoi, nous avons fait une troisième ACP. Les résultats sur la carte permettent de visualiser les positions des 3 critères restant et les coordonnées des 23 observations (voir la figure suivante). Un pourcentage égal à 90,19 % de la variance est expliqué par les deux axes représentés.

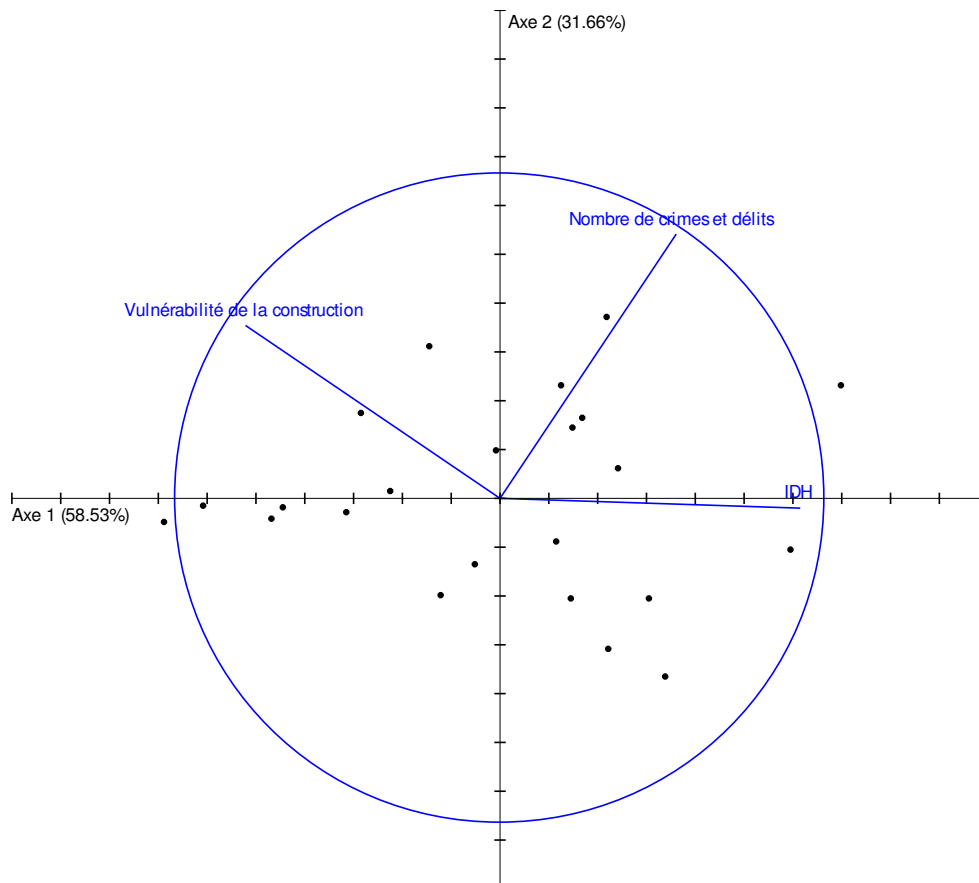


Figure V-9 : Résultat de l'ACP finale réalisée sur les valeurs des 3 facteurs discriminants.

Les valeurs du tableau donnent les coefficients de corrélation entre les critères retenus : IDH, vulnérabilité des constructions au séisme (VCS) et nombre de crimes et délits (NCD).

	IDH	Vulnérabilité des constructions au séisme	Nombre des crimes et délits
IDH	1,00		
Vulnérabilité de la construction	-0,61	1,00	
Nombre de crimes et délits	0,40	-0,05	1,00

Table V-10 : Corrélations entre les 3 facteurs discriminants.

2.3. Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.

Cette étape consiste à établir l'équation de régression pour la prévision en nous basant sur les trois variables discriminantes identifiées à l'étape précédente. Cette équation doit permettre d'évaluer la quantité potentielle des victimes pour une période et une région. Pour les trois variables discriminantes, nous disposons de l'ensemble des données aussi pour l'année 1995.

Nous rajoutons donc ces données de 1995 pour améliorer la validité des résultats. Le tableau suivant donne le détail des valeurs pour chacun des 3 facteurs discriminants. Il faut remarquer ici que les modalités de calcul de l'IDH ont évolué à compter de l'année 2009 et n'offrent plus de continuité dans l'historique (les nouvelles valeurs sont de l'ordre de 1,5 fois inférieures aux anciennes valeurs pour un même contexte). Ce point est à intégrer pour éviter un biais dans l'établissement des prévisions futures.

Région	Facteurs de Vulnérabilité								Facteurs de Résilience			
	IDH				Vulnérabilité de la construction				Nombre de crimes et délits			
	1993	1995	2000	2007	1993	1995	2000	2007	1993	1995	2000	2007
	ratio				%				quantité (mille)			
Amazonas	0,47	0,53	0,51	0,57	71%	69%	67%	63%	5,23	1,53	6,40	0,81
Ancash	0,53	0,56	0,58	0,60	69%	67%	68%	59%	7,88	6,21	8,20	4,50
Apurímac	0,40	0,47	0,46	0,56	97%	95%	94%	91%	1,63	1,69	1,56	1,13
Arequipa	0,65	0,70	0,64	0,65	23%	22%	19%	14%	16,32	16,60	11,07	9,19
Ayacucho	0,42	0,44	0,49	0,49	84%	82%	68%	68%	2,26	1,69	3,90	2,19
Cajamarca	0,45	0,49	0,49	0,56	91%	89%	88%	84%	2,25	2,63	3,89	2,29
Cusco	0,48	0,52	0,54	0,58	89%	87%	85%	81%	11,57	7,18	4,62	4,07
Huancavelica	0,37	0,41	0,46	0,54	96%	94%	95%	94%	0,75	0,80	2,00	0,02
Huánuco	0,45	0,48	0,49	0,57	73%	71%	68%	64%	3,85	4,16	4,08	0,99
Ica	0,64	0,68	0,67	0,65	65%	63%	68%	33%	7,48	8,77	5,77	2,55
Junín	0,54	0,61	0,58	0,60	66%	64%	68%	48%	11,86	9,52	2,87	1,71
La Libertad	0,58	0,64	0,61	0,62	75%	73%	60%	63%	14,81	9,33	10,78	9,76
Lambayeque	0,59	0,64	0,63	0,62	68%	66%	60%	53%	9,86	8,72	9,95	8,47
Lima - Callao	0,68	0,85	0,74	0,68	14%	14%	11%	8%	145,90	83,30	19,90	67,83
Loreto	0,53	0,58	0,56	0,59	2%	2%	2%	1%	6,36	2,10	2,90	3,49
Madre de Dios	0,60	0,61	0,62	0,63	3%	3%	2%	1%	1,99	0,85	5,95	1,39
Moquegua	0,62	0,76	0,67	0,65	48%	47%	40%	32%	1,85	2,15	5,21	1,44
Pasco	0,52	0,55	0,57	0,59	55%	54%	52%	48%	1,12	1,25	4,61	0,33
Piura	0,53	0,59	0,55	0,60	53%	52%	51%	49%	10,74	1,51	5,17	5,52
Puno	0,45	0,48	0,51	0,56	87%	85%	81%	74%	7,92	9,66	0,83	1,61
San Martín	0,54	0,58	0,55	0,59	55%	54%	45%	35%	2,86	0,36	2,78	1,34
Tacna	0,71	0,75	0,68	0,65	25%	24%	19%	13%	7,06	4,82	8,52	1,08
Tumbes	0,61	0,66	0,62	0,65	59%	58%	60%	47%	3,92	0,40	7,29	1,53
Ucayali	0,53	0,62	0,57	0,60	3%	3%	2%	1%	3,39	1,28	6,98	2,86

Table V-11 : Données des 3 facteurs discriminants pour le Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007.

Le tableau ci-après quant à lui présente les données disponibles sur ces mêmes années vis-à-vis du nombre de victimes concernées par les catastrophes sur le territoire péruvien. Ce recensement est global et concerne aussi bien les crises récurrentes, que les crises exceptionnelles telles que le tremblement de terre de Pisco (région d'Ica) en 2007 qui a fait plus de 300 000 victimes.

Notre étude ne portant que sur les crises récurrentes, de telles données mélangées sont difficiles à exploiter en l'état. Pourtant, n'ayant pu accéder à des données historiques faisant clairement le distinguo entre les crises récurrentes et les crises « exceptionnelles », nous avons été contraint de travailler sur cette base. Aussi, nous nous concentrerons plus spécifiquement dans la suite sur les régions de Amazonas, Ancash, Cajamarca, Huánuco, Junín, Madre de Dios, Pasco, Piura, Puno, San Martín, Tacna, et Tumbes qui sont les seules à présenter sur les années étudiées des historiques correspondant à la notion de crise récurrente (ici, nombre de victimes variant dans une amplitude de 2,5 fois maximum autour de la valeur moyenne).

Ce qui nous intéresse maintenant est le nombre moyen de victimes enregistré pour une catastrophe donnée ayant eu lieu dans une région donnée et à une période donnée. Nous avons rencontré ici une troisième difficulté dans l'obtention des données nécessaires à notre étude. En

effet, la méthode employée pour réaliser le décompte du nombre de crises a semble-t-il beaucoup changé entre les années 1990 et les années 2000.

Nous avons relevé des variations allant jusqu'à 16 000 % entre 1993 et 2007 pour une région donnée... N'ayant ni l'information, ni la légitimité pour retravailler ces données manuellement, il nous était impossible de disposer d'une estimation fiable du nombre de victimes pour une crise dans une région donnée et pour une année donnée. Nous avons donc limité notre application à l'estimation de la quantité de victimes pour une année donnée et une région donnée, quelque soit le nombre de crises.

No	Régions	Nombre total de victimes (données réelles)					Histogramme
		1993	1995	2000	2007	2012	
1	Amazonas	3 333	1 881	4 916	1 161	1 364	
2	Ancash	1 440	830	2 406	491	2 193	
3	Apurimac	592	812	372	3 815	3 014	
4	Arequipa	80	4 586	18 022	1 823	4 417	
5	Ayacucho	610	5 047	1 286	262	6 837	
6	Cajamarca	8 650	205	7 145	732	745	
7	Cusco	2 000	2 302	2 682	11 697	596	
8	Huancavelica	95	1 248	10 423	44 733	4 631	
9	Huanuco	3 877	4 187	5 264	1 969	5 284	
10	Ica	952	6 400	731	355 332	1 498	
11	Junin	632	1 218	734	3 267	2 790	
12	La Libertad	100	5	2 781	526	1 724	
13	Lambayeque	53	638	2 564	101	368	
14	Lima-Callao	3 282	4 308	1 955	56 116	6 312	
15	Loreto	392765	2 672	155141	2590	8 605	
16	Madre de Dios	215	1 245	737	134	231 827	
17	Moquegua	50	6 438	1 586	179	125	
18	Pasco	183	849	625	724	2 051	
19	Piura	346	2 565	1 130	1 733	649	
20	Puno	1 150	3 007	3 520	5 335	12 453	
21	San Martin	12 787	2 304	3 862	1 865	26 011	
22	Tarma	2 350	20	2 322	20	1 701	
23	Tumbes	525	750	940	49	4 655	
24	Ucayali	1 619	1 628	8 759	1 609	189	

N.B. Les données en italique sont des hypothèses établies pour pallier le manque de certaines données réelles.

Table V-12 : Nombre de victimes pour une catastrophe au Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007.

Nous avons dès lors appliqué le mécanisme décrit au Chapitre III à l'ensemble de ces données et obtenu les équations de régression multi-variées suivantes :

No	Régions	Equation de Régression Multi-Variée Obtenue
1	Amazonas	+38035,515*IDH+0,857*NCD+30227,91*VCS-40410,026
2	Ancash	+16826,995*IDH+0,686*NCD-2581,551*VCS-11168,97
3	Apurímac	+34299,477*IDH-5,995*NCD+91063,601*VCS-91550,67
4	Arequipa	+348649*IDH-10,623*NCD+814492,233*VCS-240522,978
5	Ayacucho	+621533,227*IDH+0,597*NCD+258270,109*VCS-479974,519
6	Cajamarca	-882137,69*IDH-0,699*NCD-1311377,424*VCS+1600535,042
7	Cusco	+220593,116*IDH +1,856*NCD-13987,094*VCS-112461,426
8	Huancavelica	+289253,681*IDH-8,676*NCD+570179,879*VCS-646952,953
9	Huánuco	-43062,933*IDH+0,893*NCD-64148,197*VCS+66515,424
10	Ica	+161046,558*IDH-13,451*NCD-895759,802*VCS+580042,954
11	Junín	+4118,794*IDH-0,022*NCD-12083,176*VCS+6633,609
12	La Libertad	+203718,006 *IDH+2,687*NCD-38391,946*VDC-128032,081
13	Lambayeque	+51480,326*IDH +1,779*NCD-7484,189*VCS-42826,641
14	Lima-Callao	+174323,153*IDH+0,44*QNCD-1450525,446*VCS+23054,334
15	Loreto	-8188822,64*IDH-14,17*NCD-6864768,675*VCS+4943835,767
16	Madre de Dios	+58615,818*IDH+0,022*NCD+103031,332*VCS-37854,745
17	Moquegua	+47548,176*IDH+0,026*NCD+8636,842*VCS-33671,117
18	Pasco	+43953,669*IDH-0,217*NCD+36170,662*VCS-42454,652
19	Piura	+21014,559*IDH-0,134*NCD+16910,62*VCS-18383,037
20	Puno	+75221,765*IDH+0,089*NCD+27714,244*VCS-57515,927
21	San Martin	-3418533,812*IDH-55,448*NCD-445324,247*VCS+2248853,148
22	Tacna	-38427,373*IDH+0,268*NCD+26868,258*VCS+21099,831
23	Tumbes	+11223,028*IDH+0,071*NCD+6190,019*VCS-10253,339
24	Ucayali	+39359,878*IDH+1,838*NCD+102590,051*VCS-28361,224

Table V-13 : Equation de régression pour chacun des 24 régions du Pérou.

Il nous reste désormais à valider la valeur de ces prévisions avant de les utiliser dans le modèle de localisation des entrepôts de pré-positionnement. Une première validation statistique habituelle consiste à vérifier que la liaison globale entre la variable expliquée Y et les variables explicatives Xi est significative. Pour cela, on utilisera un test de Fisher. La seconde validation consiste à comparer a posteriori les résultats obtenus par la régression avec les données réelles.

2.3.1. L'analyse de la régression linéaire multiple, approche statistique.

Le test statistique F_0 a une distribution F (Fisher) avec $v_1 = v_2 = k$ et $n - p$ degrés de liberté dans le numérateur et le dénominateur, respectivement. Dans ce cas, si le test statistique est supérieur à la valeur de $F_{\alpha, k, n - p}$ l'hypothèse nulle est rejetée. Par conséquent on peut conclure que la

variable indépendante est reliée à au moins une des variables indépendantes. Exemple. Pour la région Amazonas.

(i) L'hypothèse.

Ho : $\beta_1=\beta_2=\beta_3=0$

H1 : à moins une des $\beta_i \neq 0$

(ii) Règle de la décision.

Pour : $\alpha=0,05$; $k=3$; $n=6$.

On rejete Ho si $F_{\text{calculé}} > F_{\text{critique}}$

On accepte Ho si $F_{\text{calculé}} \leq F_{\text{critique}}$

(iii) Résultats.

En utilisant la fonction du logiciel Excel pour l'analyse de régressions linaires multiple, nous avons les résultats suivants : $F_{\text{calculée}} = 13,185$ est supérieur à $F_{\text{critique}} = 0,10468$. Par conséquent, on peut affirmer qu'il y a une liaison significative entre le nombre de victimes et les variables indépendantes IDH, NCD et VCS.

Régions	F calculé	F critique	Hypothèse: Ho	Hypothèse: H1
Amazonas	13,186	0,105	Rejetée	Accepté
Ancash	2,082	0,105	Rejetée	Accepté
Apurímac	44,621	0,105	Rejetée	Accepté
Arequipa	0,880	0,105	Rejetée	Accepté
Ayacucho	0,247	0,105	Rejetée	Accepté
Cajamarca	0,228	0,105	Rejetée	Accepté
Cusco	1,184	0,105	Rejetée	Accepté
Huancavelica	1,473	0,105	Rejetée	Accepté
Huánuco	12,933	0,105	Rejetée	Accepté
Ica	1,137	0,105	Rejetée	Accepté
Junín	0,577	0,105	Rejetée	Accepté
La Libertad	1,564	0,105	Rejetée	Accepté
Lambayeque	4,095	0,105	Rejetée	Accepté
Lima - Callao	3,858	0,105	Rejetée	Accepté
Loreto	9,660	0,105	Rejetée	Accepté
Madre de Dios	0,256	0,105	Rejetée	Accepté
Moquegua	2,472	0,105	Rejetée	Accepté
Pasco	29,879	0,105	Rejetée	Accepté
Piura	13,022	0,105	Rejetée	Accepté
Puno	0,406	0,105	Rejetée	Accepté
San Martín	0,147	0,105	Rejetée	Accepté
Tacna	14,081	0,105	Rejetée	Accepté
Tumbes	2,118	0,105	Rejetée	Accepté
Ucayali	5,222	0,105	Rejetée	Accepté

Table V-14 : Résultats du Test de signification global.

2.4. Etape 4 : Validation et exploitation du modèle

A la validation statistique, on rajoute une validation du modèle de prévision réalisée en comparant les données réellement constatées sur le terrain pour l'année 2012, aux résultats issus de l'application des modèles de prévisions construits pour chaque région. En théorie, lorsque le ratio de déviation est inférieur à 25 %, le modèle est considéré comme valide. Pour les besoins de la démonstration, la valeur de l'IDH de 2012 a été ré-étalonnée selon la même unité de mesure que

les années 1993, 1995, 2000 et 2007. Pour ce faire, nous avons ajouté à la valeur de l'IDH de 2007 la tendance constatée sur les 15 années précédentes pour la région considérée. Ce calcul donne par exemple un IDH de 0,61 en 2012 pour la région de Huánuco contre 0,37 avec la nouvelle échelle. Pour bien comprendre le principe de l'évaluation, intéressons-nous justement de plus près à la région de Huánuco qui correspond aux hypothèses associées aux crises récurrentes telles que nous les avons définies précédemment. Le tableau suivant présente les données employées, ainsi que le résultat obtenu pour l'année 2012. La régression aboutit à une prévision de 5013 victimes pour l'année 2012. La réalité des faits a été selon l'INDECI de 5284 victimes pour cette même année, soit un ratio de déviation de 5 %, ce qui est très satisfaisant (inférieur à 25 % selon les critères proposés au Chapitre III).

Huánuco	IDH	VCS	NCD	Victimes
1993	0,447	0,73	3852	3 877
1995	0,476	0,71	4161	4 187
2000	0,494	0,68	4080	5 264
2007	0,566	0,64	988	1 969
2012	0,606	0,59	2973	5013

Table V-15 : Résultat de la régression multi-variée sur la région de Huánuco, année 2012.

Ce cas d'application basé sur des données réelles démontre la pertinence de notre approche. Pour mettre en œuvre le calcul de prévision pour l'année 2012 sur l'ensemble des régions, nous avons considéré les données suivantes :

No	Région	IDH 2012	Nombre de crimes et délits (NCD) : 2102	Vulnérabilité de la construction (VDC) : 2012
1	Amazonas	0,609	4 146	0,59
2	Ancash	0,621	6 862	0,55
3	Apurímac	0,616	1 438	0,88
4	Arequipa	0,647	12 192	0,10
5	Ayacucho	0,510	2 782	0,57
6	Cajamarca	0,601	2 809	0,81
7	Cusco	0,613	6 751	0,77
8	Huancavelica	0,597	923	0,93
9	Huánuco	0,606	2 973	0,59
10	Ica	0,656	5 265	0,23
11	Junín	0,620	5 479	0,43
12	La Libertad	0,636	11 783	0,54
13	Lambayeque	0,627	9 428	0,45
14	Lima - Callao	0,685	77 876	0,04
15	Loreto	0,610	4 247	0,00
16	Madre de Dios	0,642	3 110	0,00
17	Moquegua	0,664	2 833	0,24
18	Pasco	0,611	2 021	0,45
19	Piura	0,620	7 143	0,47
20	Puno	0,598	3 453	0,68
21	San Martín	0,608	2 327	0,25
22	Tacna	0,626	5 552	0,07
23	Tumbes	0,662	4 246	0,43
24	Ucayali	0,628	4 410	0,00

Table V-16 : Données pour le calcul de prévision de l'année 2012.

Evidemment tous les cas ne fonctionnent pas aussi bien que le cas de la région de Huánuco... L'extension à l'ensemble des régions du Pérou pose plusieurs problèmes compte tenu des deux difficultés évoquées précédemment :

- Données sur le nombre de victimes mélangeant les crises exceptionnelles et les crises récurrentes, sans possibilité de faire proprement le distinguo ;
- Absence d'un décompte fiable et homogène du nombre de crises permettant de déterminer le nombre de victimes pour une crise donnée (et une seule).

L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le tableau suivant. Selon les critères de validation définis au Chapitre III, seules 2 régions présentent des modèles très fiables (ratio inférieur à 25 %) : Ancash et Huánuco. 3 autres régions ont des modèles corrects (ratio inférieur à 50 %) : Junín, La Libertad et Puno. Les autres régions sont au-delà du critère d'acceptation proposée au Chapitre III. Néanmoins, il convient de relativiser ce jugement en considérant que dans de pareilles situations, c'est avant tout l'ordre de grandeur qui va nous intéresser. En ce sens, nous proposons de tester les résultats obtenus selon un critère de variabilité inférieure à 250 % par rapport à la réalité.

No	Régions	Validation du modèle		
		Prévision 2012	2012	Validité ? Variation < 250%
1	Amazonas	4138	1 364	OK
2	Ancash	2566	2 193	OK
3	Apurímac	1087	3 014	OK
4	Arequipa	-	4 417	NV
5	Ayacucho	-	6 837	NV
6	Cajamarca	12870	745	NV
7	Cusco	24615	596	NV
8	Huancavelica	47896	4 631	NV
9	Huánuco	5013	5 284	OK
10	Ica	405836	1 498	NV
11	Junín	3909	2 790	OK
12	La Libertad	12555	1 724	NV
13	Lambayeque	2840	368	NV
14	Lima-Callao	115093	6 312	NV
15	Loreto	-	8 605	NV
16	Madre de Dios	-	231 827	NV
17	Moquegua	48	125	OK
18	Pasco	64	2 051	OK
19	Piura	1627	649	OK
20	Puno	6491	12 453	OK
21	San Martín	-	26 011	NV
22	Tacna	411	1 701	OK
23	Tumbes	155	4 655	OK
24	Ucayali	4460	189	NV

Table V-17 : Evaluation de la qualité des modèles de prévisions obtenus (année 2012).

Selon ce critère, il apparaît que les modèles proposés fonctionnent globalement bien dans 11 régions sur 24.

Pour l'essentiel, il s'agit des régions que nous avons identifiées au départ comme étant les plus en phase avec nos hypothèses de crises récurrentes (données non perturbées par des crises majeures). Pour les autres régions par contre, l'approche proposée ne semble pas satisfaisante. La proposition faite est relativement fiable, dès lors que nous disposons de données propres à distinguer ce qui est dû à des crises récurrentes, de ce qui ne l'est pas.

On notera néanmoins que trois régions dont les données de récurrence étaient disponibles ne présentent pas des modèles valides : Cajamarca, Madre de Dios et San Martin. Pour les deux dernières, cela s'explique par le fait que 2012 a vu la survenue de deux catastrophes d'ampleur exceptionnelle dans ces régions. Par construction, nos modèles n'ont pas « prévu » ces catastrophes et leurs conséquences. Pour Cajamarca, il s'agit d'une région qui rencontre une très forte variabilité dans la survenue des crises qui la concernent. L'explication est sans doute ici liée au fait que la fréquence de survenue des crises récurrentes la concernant n'est pas annuel mais plutôt pluri-annuel.

Du coup, le modèle n'est pas tout à fait pertinent sur cet intervalle de temps. On notera que certaines régions ont des résultats nuls. Il s'agit en fait de régions pour lesquelles le modèle obtenu donne avec les valeurs de 2012 pour les facteurs discriminants des résultats négatifs (équation de régression). Probablement que dans ces cas, les facteurs identifiés à l'échelle du pays, ne sont pas les plus adaptés aux situations spécifiques de ces régions. Pour être plus pertinent, l'étape 2 de la méthode pourrait être réitérée à l'échelle de la région. Mais cela nécessiterait la mise à disposition des données utiles...

Les résultats en demi-teinte que nous obtenons sont, selon nous, essentiellement liés à la qualité des données que nous avons réussi à collecter. Ce problème de qualité des données nous invite à envisager dès à présent une suite à donner à ce travail qui consistera à collecter des données plus à même d'alimenter notre méthode.

Pour pouvoir développer plus avant le cas d'application, nous proposons de substituer le calcul de prévision par régression multi-variée - adapté aux seuls cas des crises récurrentes - par une approche de type moyenne mobile de longueur 2 autour de la valeur du nombre de victimes pour 2011 pour estimer la demande de 2012.

Le tableau suivant montre que cette option est globalement satisfaisante et nous permet d'obtenir sur l'ensemble des 24 régions des estimations de demande acceptables. Pour pouvoir développer plus avant le cas d'application, pour les régions où l'approche par régression multi-variée est inadaptée, nous proposons d'utiliser une approche de type moyenne.

Nous disposons des données du nombre de victimes sur les années 2003 à 2012.

Régions	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Moyen. 2003-2012	1,5 Moyen.
Arequipa	1 318	860	132	108	1 823	224	680	366	1 906	4 417	1 183	1 775
Ayacucho	1 071	445	2 711	1 132	262	886	4 952	7 796	14 309	6 837	4 040	6 060
Cajamarca	2 130	1 285	5 082	1 315	732	5 474	1 282	1 160	1 713	745	2 092	3 138
Cusco	4 760	1 338	1 579	2 221	11 697	4 867	19	28 755	8 899	596	6 473	9 710
Huancavelica	1 075	1 443	938	1 796	44 733	281	249	1 123	3 925	4 631	6 019	9 029
Ica	137	54	21 974	412	355 332	606	238	653	3 201	1 498	38 411	57 616
La Libertad	228	100	475	555	526	260	1 035	5 073	1 150	1 724	1 113	1 669
Lambayeque	238	12	41	519	101	8 529	397	380	425	368	1 101	1 652
Lima-Callao	2 468	1 227	1 381	2 114	56 116	3 092	1 315	1 290	1 777	6 312	7 709	11 564
Loreto	2 002	3 313	4 272	2 939	2 590	2 946	5 752	6 006	100 023	8 605	13 845	20 767
Madre de Dios	6 294	208	295	447	134	56	203	54	230	231 827	23 975	35 962
San Martin	4 316	2 314	11 773	1 553	1 865	1 995	4 305	3 359	2 972	26 011	6 046	9 069
Ucayali	1 557	2 429	2 105	3 201	1 609	2 300	1 056	1 545	10 469	189	2 646	3 969

Table V-18 : Calcul des moyennes de Victimes de 2003 à 2012.

Ces données correspondent aux victimes des crises récurrentes et non récurrentes. Faute d'historique pour redresser les données, nous adoptons la procédure suivante :

- Calculer la moyenne M1 des victimes de la région sur 2003 à 2012 ;
- Si le nombre de victimes d'une année est supérieure à 1,5M1, on considère qu'il y a eu catastrophe non récurrente et on ne retient que M1 victimes pour l'année ;
- On calcule la moyenne M2 sur les données rectifiées ;
- On retient M2 comme estimation du nombre de victimes pour la région.

Régions	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	moyenne
Arequipa	1 318	860	132	108	1 183	224	680	366	1 183	1 183	724
Ayacucho	1 071	445	2 711	1 132	262	886	4 952	4 040	4 040	4 040	2 358
Cajamarca	2 130	1 285	2 092	1 315	732	2 092	1 282	1 160	1 713	745	1 455
Cusco	4 760	1 338	1 579	2 221	6 473	4 867	19	6 473	8 899	596	3 723
Huancavelica	1 075	1 443	938	1 796	6 019	281	249	1 123	3 925	4 631	2 148
Ica	137	54	21 974	412	38 411	606	238	653	3 201	1 498	6 718
La Libertad	228	100	475	555	526	260	1 035	1 113	1 150	1 113	656
Lambayeque	238	12	41	519	101	1 101	397	380	425	368	358
Lima-Callao	2 468	1 227	1 381	2 114	7 709	3 092	1 315	1 290	1 777	6 312	2 869
Loreto	2 002	3 313	4 272	2 939	2 590	2 946	5 752	6 006	13 845	8 605	5 227
Madre de Dios	6 294	208	295	447	134	56	203	54	230	23 975	3 190
San Martin	4 316	2 314	6 046	1 553	1 865	1 995	4 305	3 359	2 972	6 046	3 477
Ucayali	1 557	2 429	2 105	3 201	1 609	2 300	1 056	1 545	2 646	189	1 864

Table V-19 : Estimations de demande récurrente sur les 24 régions : données corrigées.

No.	Régions	Modèle	Real 2012 (ou Moyenne 2003- 2012)	Prévision 2012	Variation absolue	Variation < 150 %
1	Amazonas	Multi-Variée	1 364	4 138	203,4%	NV
2	Ancash	Multi-Variée	2 193	2 566	17,0%	OK
3	Apurímac	Multi-Variée	3 014	1 087	63,9%	OK
4	Arequipa	Moyenne	1 183	724	38,8%	OK
5	Ayacucho	Moyenne	4 040	2 358	41,6%	OK
6	Cajamarca	Moyenne	2 092	1 455	30,4%	OK
7	Cusco	Moyenne	6 473	3 723	42,5%	OK
8	Huancavelica	Moyenne	6 019	2 148	64,3%	OK
9	Huánuco	Multi-Variée	5 284	5 013	5,1%	OK
10	Ica	Moyenne	38 411	6 718	82,5%	OK
11	Junín	Multi-Variée	2 790	3 909	40,1%	OK
12	La Libertad	Moyenne	1 113	656	41,1%	OK
13	Lambayeque	Moyenne	1 101	358	67,5%	OK
14	Lima-Callao	Moyenne	7 709	2 869	62,8%	OK
15	Loreto	Moyenne	13 845	5 227	62,2%	OK
16	Madre de Dios	Moyenne	23 975	3 190	86,7%	OK
17	Moquegua	Multi-Variée	125	48	61,6%	OK
18	Pasco	Multi-Variée	2 051	64	96,9%	OK
19	Piura	Multi-Variée	649	1 627	150,7%	NV
20	Puno	Multi-Variée	12 453	6 491	47,9%	OK
21	San Martin	Moyenne	6 046	3 477	42,5%	OK
22	Tacna	Multi-Variée	1 701	411	75,8%	OK
23	Tumbes	Multi-Variée	4 655	155	96,7%	OK
24	Ucayali	Moyenne	2 646	1 864	29,6%	OK
Qualité globale de la prévision des événements récurrents						91,7%

Table V-20 : Modèles retenus et prévisions associées pour 2012 sur l'ensemble des 24 régions.

L'ensemble de ces données constitue un premier scénario de demandes récurrentes de court terme (petits tremblements de terre, inondations, coulées de boue...dans un période annuelle) et de moyenne terme.

3. Construction des scénarios

3.1. Choix des scénarios

Politiquement et administrativement, le Pérou est divisé en 24 régions. Toutes les données et statistiques disponibles se réfèrent à ce découpage. Ceci nous a conduits tout naturellement à retenir ces 24 régions comme « zonage » pour notre étude.

Nous avons constitué un premier scénario nous donnant les demandes dues aux catastrophes récurrentes (inondations, tremblements de terre d'intensité moyenne). Sur la base de ce seul scénario, nous pourrions utiliser le modèle mono-scénario pour déterminer la localisation des entrepôts répondant à ces demandes récurrentes. Mais le réseau que nous voulons implanter doit aussi permettre de réagir en cas de catastrophes non récurrentes. Pour avoir un réseau plus robuste, nous allons ajouter à ce premier scénario « récurrent » des scénarios correspondants à ces catastrophes non récurrentes. Le scénario récurrent aura un poids important (ici 50%). Nous utiliserons ensuite le modèle stochastique multi-scénario pour déterminer le réseau d'entrepôts.

Pour les catastrophes non récurrente, nous n'avons pu recueillir des données fiables et exploitables que sur les catastrophes de type tremblements de terre (la base des 2200 tremblements de terre répertoriés par l'IGP sur la période 1970 – 2007). Pour établir des scénarios significatifs (épicentre de la catastrophe, gravité, propagation, répercussion sur les infrastructures) et avoir des probabilités d'occurrence plausibles, nous nous sommes appuyés sur cette base pour valider la mise en œuvre de nos propositions.

Nous avons synthétisé cette base par région et par magnitude. Nous avons gardé cinq classes pour la magnitude :

- C0 : magnitude < 5,5 (ces séismes ne donne pas lieu à intervention humanitaire) ;
- C1 : magnitude entre 5,5 et 6,0 ;
- C2 : magnitude entre 6,0 et 7,0 ;
- C3 : magnitude entre 7,0 et 8,0 ;
- C4 : magnitude entre 8,0 et 9,0.

Le tableau suivant présente les probabilités d'occurrences et de magnitudes des tremblements de terre sur chaque région. La colonne « Fréquence » donne la probabilité qu'un séisme se produise dans une région. Les colonnes « % dans la région » donne la probabilité qu'un séisme frappant la région soit d'une classe donnée.

No	Régions	Fréquence dans la région	Distribution des séismes par classe de magnitude				
			CO	C1	C2	C3	C4
1	Amazonas	1,30 %	50 %	0 %	0 %	50 %	0 %
2	Ancash	10,0 %	75 %	0 %	0 %	0 %	25 %
3	Apurímac	1,30 %	86 %	0 %	14 %	0 %	0 %
4	Arequipa	10,0 %	93 %	0 %	0 %	0 %	7 %
5	Ayacucho	1,30 %	67 %	0 %	33 %	0 %	0 %
6	Cajamarca	1,30 %	88 %	0 %	0 %	12 %	0 %
7	Cusco	1,30 %	93 %	0 %	0 %	7 %	0 %
8	Huancavelica	1,30 %	89 %	0 %	11 %	0 %	0 %
9	Huánuco	1,30 %	60 %	40 %	0 %	0 %	0 %
10	Ica	10,0 %	86 %	0 %	0 %	0 %	14 %
11	Junín	1,30 %	82 %	0 %	0 %	18 %	0 %
12	La Libertad	10,0 %	86 %	0 %	0 %	14 %	0 %
13	Lambayeque	1,30 %	83 %	0 %	17 %	0 %	0 %
14	Lima	10,0 %	0 %	96 %	0 %	0 %	4 %
15	Loreto	1,30 %	0 %	0 %	75 %	25 %	0 %
16	Madre de Dios	1,30 %	0 %	50 %	50 %	0 %	0 %
17	Moquegua	10,0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
18	Pasco	1,30 %	60 %	40 %	0 %	0 %	0 %
19	Piura	1,30 %	0 %	0 %	80 %	20 %	0 %
20	Puno	1,30 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
21	San Martin	1,30 %	0 %	0 %	80 %	20%	0 %
22	Tacna	10,0 %	80 %	0 %	0 %	0 %	20%
23	Tumbes	10,0 %	66 %	0 %	0 %	34%	0 %
24	Ucayali	1,30 %	66 %	0 %	34 %	0 %	0 %
Espérance			71 %	11 %	5 %	7%	7%

Table V-21 : Probabilité d'occurrence et de magnitude des séismes au Pérou.

Les séismes de magnitude <5,5 font partie des catastrophes récurrentes et sont déjà pris en compte dans le scénario « récurrent ».

Puno n'ayant pas de séismes majeurs est écarté.

Pour les régions de Lima (C1, C4), Madre de Dios (C1, C2), Piura (C2, C3) et San Martin (C2, C3) nous aurons deux scénarios. Au total nous aurons 27 scénarios.

Leurs probabilités seront proportionnelles à leurs fréquences dans l'ensemble des classes C1, C2, C3 et C4. Ce premier travail nous définit l'épicentre et la gravité de la catastrophe à l'épicentre. La seconde partie consiste à propager cette catastrophe sur les régions voisines en respectant les règles de propagation.

Par exemple, comme nous l'avons dit précédemment, une catastrophe sur Lima affectera aussi les régions côtières d'Ancash et Ica mais n'affectera pas les régions de Pasco et Junin de l'autre côté de la Cordillère.

Ensuite, il faut estimer la gravité sur ces régions pour pouvoir déterminer l'ensemble des demandes. Exemple : un séisme de niveau 8,5 à Lima donnera un séisme de niveau 7,5 sur Ancash et Ica. La dernière étape est d'estimer le nombre de victimes.

En première approche nous avons pris comme règle : le nombre de victimes est proportionnel à la taille de la population de la région touchée et à l'intensité du séisme. Le tableau suivant donne le pourcentage de la population touchée selon la magnitude.

Magnitude		Pourcentage de population touchée
de	à	
<6	6	0,001 %
6	7	0,100 %
7	8	1,000 %
8	9	10,000 %
9	10	100,000 %

Table V-22 : Part de la population affectée selon la magnitude.

A titre d'illustration, voici les demandes pour le scénario relatif à Ica et les deux relatifs à Lima.

Epicentre	Catégorie	Ancash	Arequipa	Ica	Lima
Ica	C4	0	6 889	68 886	6 889
Lima	C1	99	0	99	99
Lima	C4	99 302	0	99 302	993 025

Table V-23 : Scénarios pour les régions Lima et Ica.

Le tableau suivant donne l'ensemble des 28 scénarios (le scénario récurrent et les 27 non récurrents) avec les régions impactées, le nombre total de victimes du scénario et la probabilité de survenue de ce scénario.

En espérance, le nombre de victimes est de l'ordre de 114 000.

No du scénario	Région épigentre	Total régions impactées	Nombre de victimes	Fréquence du scénario
1	Evénements récurrents toutes régions		60 276	50,00 %
2	Amazonas	Amazonas- Loreto	1 977	1,03 %
3	Ancash	Ancash - La Libertad - Lima	87 560	4,10 %
4	Apurimac	Apurimac	201	0,29 %
5	Arequipa	Arequipa - Ica - Moquegua	135 720	1,15 %
6	Ayacucho	Arequipa - Ayacucho - Ica	392	0,68 %
7	Cajamarca	Cajamarca	4 952	0,25 %
8	Cusco	Cusco	6 977	0,14 %
9	Huancavelica	Huancavelica	153	0,23 %
10	Huánuco	Huánuco	4	0,82 %
11	Ica	Arequipa - Ica - Lima	82 663	2,30 %
12	Junin	Junin	8 823	0,37 %
13	La Libertad	La Libertad	13 225	2,30 %
14	Lambayeque	Lambayeque	956	0,35 %
15	Lima	Ancash - Ica - Lima	298	15,75 %
16	Lima	Ancash - Ica - Lima	1 191 630	0,66 %
17	Loreto	Loreto	640	1,64 %
18	Loreto	Loreto	903	0,49 %
19	Madre de Dios	Moquegua	1	0,98 %
20	Madre de Dios	Moquegua	148	1,15 %
21	Pasco	Pasco	2	0,82 %
22	Piura	Piura	1 352	0,98 %
23	Piura	Piura	6 915	1,15 %
24	San Martin	Loreto - San Martin	525	0,98 %
25	San Martin	Loreto - San Martin	5 721	1,15 %
26	Tacna	Pasco - Tacna	31 847	3,28 %
27	Tumbes	Puno - Tumbes	2 196	5,58 %
28	Ucayali	Ucayali	361	0,70 %
En espérance			46 790	100,00 %

Table V-24 : Les scénarios obtenus y la probabilité d'ocurrence.

Les séismes exceptionnels de grande intensité (scénario 4 et 15) vont demander l'intervention de l'aide internationale. Les stocks constitués par le Pérou seront largement insuffisant. Ces stocks sont actuellement prévus pour 100 000 victimes. Avec ce chiffre, en espérance, 7 574 victimes ne

pourront pas être secourues. Le tableau suivant donne, en espérance, le nombre de victimes qu'il sera impossible de secourir selon la capacité globale stockée.

N° Scénario	Nombre des victimes	Fréquence de scénario	Capacité stockée		
			100 000	200 000	300 000
5	135 720	1,15 %	35 720	0	0
16	1 191 630	0,66 %	1 091 630	991 630	891 630
Nombre de victimes structurellement « impossibles » à secourir avec la CLH			7 574	6 508	5 852

Table V-25 : Nombre de victimes structurellement impossible à secourir.

3.2. Evaluation de l'impact sur les infrastructures

Pour le calcul des dommages sur l'infrastructure, nous avons utilisé les études de référence menées par Tavera et al. (2001) et Predes (2009) ainsi que la norme péruvienne pour les constructions antisismiques MVCS (2003).

En cas de séismes, des ondes sismique se forment, ondes qui vont se propager et/ou s'amplifier en fonction notamment de la nature du sol et des conditions géologiques, géomorphologiques et topographiques de la zone traversée. Sous l'effet d'un même train d'onde, tous les sols ne vont pas se déformer et réagir de la même manière. Par suite, les dégâts seront différents d'une zone à l'autre. Voici un exemple de classification des sols utilisé pour Lima.

Type de zone	Niveau de danger	Périodes de vibration naturelle (secondes)	Facteur Sismique d'amplification (secondes)	Période naturel du sol (Ts)	Correspondance avec le type du sol (NBC, 2003)
I	Faible	0,1 – 0,3	1,0	0,4 s	S1
II	Moyenne	0,3 – 0,5	1,2	0,6 s	S2
III	Haut	0,5 – 0,7	1,4	0,9 s	S3
IV	Très haut	< 0,7	1,6	1,2 s	S4

Table V-26 : Résumé du zonage par sensibilité sismique (cas région Lima).

Source : Predes (2009) : PNUD (2009).

Ici nous retiendrons deux types de zone : les zones sensibles (SZ) dans lesquels les dégâts seront élevés et les zones non sensibles (NSZ) où les dégâts seront moindres.

3.2.1. L'impact sur la capacité d'entreposage.

Pour la région où se situe l'épicentre de la catastrophe, les experts estiment que la perte en terme de capacité de stockage, dépend à la fois de l'intensité de la catastrophe, des caractéristiques géologiques locales et de la vulnérabilité de la construction de l'entrepôt.

Lorsque la catastrophe se propage sur une région frontalière, elle perd de son intensité et les pertes seront plus faibles. Dans les deux cas, les pertes seront plus élevées en zone sensible SZ qu'en zone non sensible ZNS.

Par exemple, pour un tremblement de terre de 7,5 M, si la région de l'épicentre est une zone classée sensible (SZ), son entrepôt perdra 60 % de sa capacité de stockage. Mais, si la région est en zone non sensible NSZ, la perte sera seulement de 40 %, voir la figure suivante, pour les capacités d'entreposage (A).

En ce qui concerne les régions frontalières concernées par la propagation de la catastrophe, elles perdent 30 % de leurs capacités de stockage si elles appartiennent à une zone sensible ou 10 % en zone non sensible NSZ. Tous ces pourcentages ont été estimés sur la base de l'avis de praticiens sont impliqués dans les activités opérationnelles liées à la réponse humanitaire péruvienne.

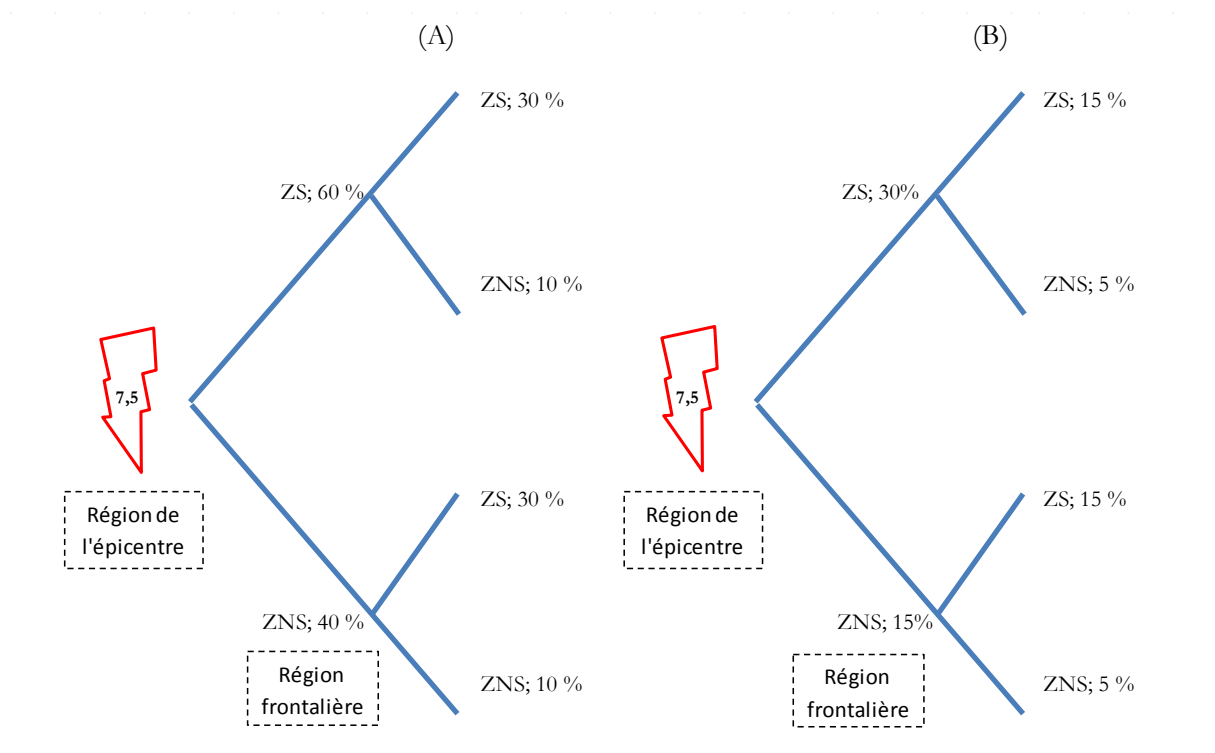


Figure V-10 : Arbre de propagation de l'impact.

3.2.2. L'impact sur la capacité de transport.

La capacité de transport est généralement réduite après des événements importants comme un tremblement de terre. En raison de la destruction totale ou partielle de véhicules (camions, trains, avions, navires), de l'arrêt des services publics ou des entreprises privées distribuant pétrole, gaz, électricité, eau potable, etc., de la destruction des installations et des infrastructures (ponts, port, routes, etc.).

Par conséquent, les entreprises susceptibles de fournir ou transporter les secours pendant les opérations humanitaires peuvent ne pas être utilisables sur de longues périodes, même si elles n'ont pas souffert de dommages directs (NRC, 2006).

Nous utiliserons ici aussi un arbre de décision pour tenir compte de l'avis des experts quant à la réduction de la capacité de transport. Par exemple, pour un tremblement de terre de 7,5 M, si la région de l'épicentre appartient à une zone SZ, la capacité de transport sera réduite de 30%. Pour les régions épicentre NSZ, la perte sera de 15 % voir la figure antérieur part (B).

La table suivante donne les chiffres détaillés des pertes de capacité de l'entreposage et du transport, en fonction de l'intensité de la catastrophe et les caractéristiques de la région.

Magnitude	% Réduction de la capacité					
	Stockage			Flux de transport		
	Epicentre	Frontière		Epicentre	Frontière	
	SZ	SZ	SNZ	SZ	SZ	SNZ
	SNZ			SNZ		
5,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6,5	40%	20%	5%	10%	5%	1%
	20%	20%	5%	5%	5%	1%
7,5	60%	30%	10%	30%	15%	5%
	40%	30%	10%	15%	15%	5%
8,5	80%	40%	20%	70%	35%	15%
	60%	40%	20%	35%	35%	15%
9,5	100%	60%	40%	100%	65%	35%
	80%	60%	40%	65%	65%	35%
10,0	100%	80%	60%	100%	80%	60%
	100%	80%	60%	100%	80%	60%

Table V-27 : Vue d'ensemble de réduction potentielle des capacités en fonction de l'intensité.

Pour construire des scénarios plus fins, d'autres points pourraient être pris en compte. On pourrait s'interroger sur les services disponibles de camionnage, l'existence de goulots d'étranglement potentiels tels que des ponts ou des tunnels, ainsi que sur d'éventuelles pénuries pour obtenir le carburant et d'autres ressources vitales. (Coppola, 2007) répertorie les diverses actions pour évaluer les capacités logistiques post catastrophes. Cette liste comprend des éléments supplémentaires liés à l'accessibilité, tels que les dommages au réseau routier en ce qui concerne la possibilité de livrer du matériel de secours par routes, les restrictions telles que le poids, la largeur, la longueur, ou les limites de hauteur des ponts, tunnels, etc. Il recommande également de vérifier la disponibilité et le coût des moyens de transport, notamment ceux des camions utilisés par les gouvernements ou les ONGs.

3.3. Les stocks

Nous avons retenu un coût fixe pour la gestion des entrepôts de 10 000, un coût variable en raison de l'achat et la possession des kits de 1 par kit. Une victime non secourue (démuni) a un coût de 10 000.

Le tableau suivant donne les coûts de transport d'un kit entre quelques régions. A l'exception de Loreto et Ucayali, les frais de transport sont des coûts de transport par camion. En raison de la taille du Pérou (deux fois la surface de la France) et du manque d'infrastructures de transport terrestre, Loreto et Ucayali qui appartiennent à la zone de forêt péruvienne ne sont accessibles que par avion. Aussi, les coûts de transport pour ces régions sont plus élevés.

Régions	Arequipa	Ayacucho	Cusco	Ica	Junin	Lima	Madre de Dios	Puno	Ucayali
Arequipa	0,0	8,5	4,6	7,1	10,6	10,2	7,6	2,9	100,0
Ayacucho	8,5	0,0	5,1	5,0	2,1	6,1	9,4	9,0	100,0
Cusco	4,6	5,1	0,0	7,1	7,2	10,7	4,3	3,9	100,0
Ica	7,1	5,0	7,1	0,0	4,4	3,6	11,4	9,4	100,0
Junin	10,6	2,1	7,2	4,4	0,0	4,0	11,5	11,0	100,0
Lima	10,2	6,1	10,7	3,6	4,0	0,0	15,0	13,0	100,0
Madre de Dios	7,6	9,4	4,3	11,4	11,5	15,0	0,0	5,6	100,0
Puno	2,9	9,0	3,9	9,4	11,0	13,0	5,6	0,0	100,0
Ucayali	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0

Table V-28 : Coûts de transport entre quelques régions du Pérou.

4. Exploitation du modèle et résultats

4.1. Capacité totale stockée de 100 000.

Nous avons fait tourner le modèle pour une capacité de 100 000 kits, sans limiter la taille des entrepôts (voir les deux tableaux suivants). Nous avons fait varier le nombre de ces entrepôts de 1 à 24. Au-delà de 8 entrepôts, la solution ne change plus. Dans tous les cas, on n'ouvre pas d'entrepôts dans les régions d'Ica, Tacna et Tumbes. Sur les petites valeurs, on remarque l'importance prise par le stock à Lima. Cette importance se confirme sur l'ensemble des scénarios.

Nombre des entrepôts	Transport	Entrepôt	Total	Victimes totales	Démunis
1	579 657	109 233	688 890	12 676	5 101
2	566 463	119 163	685 626	11 554	3 980
3	517 441	129 094	646 534	11 065	3 491
4	503 153	139 024	642 176	10 669	3 095
5	487 918	148 954	636 872	10 458	2 884
6	484 834	158 884	643 719	10 273	2 699
7	486 133	168 815	654 948	10 229	2 654
8 - 24	485 695	178 745	664 440	10 228	2 654

Table V-29 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 1).

	Amazonas	Ancash	Apurimac	Arequipa	Ayaacuho	Cajamarca	Cusco	Huancaavelica	Huanuco	Ica	Junin	LaLibertad	Lambayeque	Lima	Loreto	Madre De Dios	Moquegua	Pasco	Piura	Puno	SanMartin	Tacna	Tumbes	Ucayali
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	40 300	-	-	-	-	59 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	11 744	-	-	-	-	33 711	-	-	-	-	54 545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	11 744	-	-	-	8 445	23 947	-	-	-	-	55 864	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	11 744	-	-	-	8 445	23 947	-	-	7 253	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	11 744	3 834	-	-	6 240	22 059	-	-	7 512	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	-	-	10 937	4 253	-	-	5 703	22 059	-	-	5 994	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	-	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-														

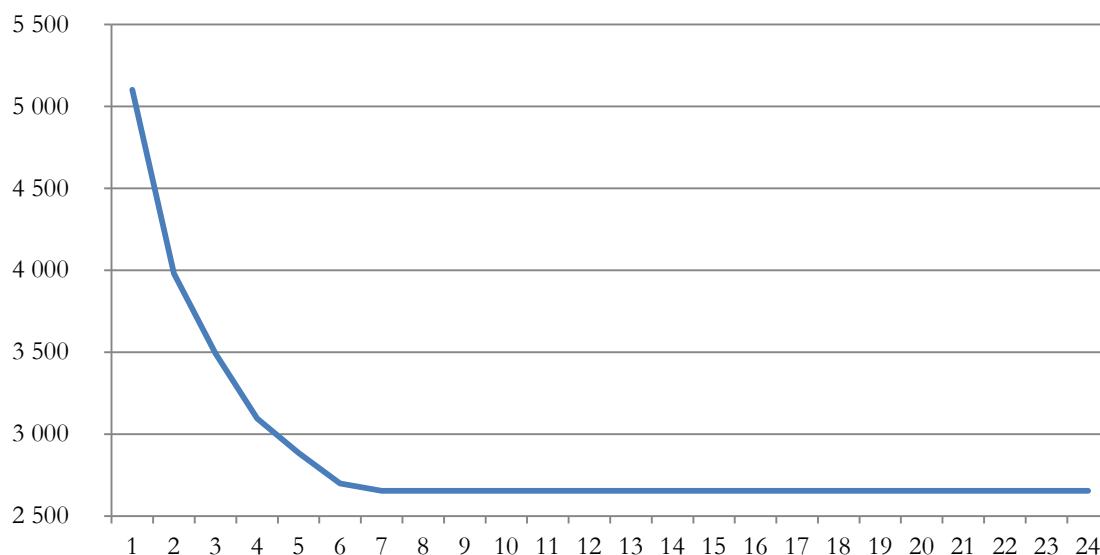
Table V-30 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 2).

Le tableau suivant donne en espérance, le nombre de victimes non secourues. On rappelle que pour une capacité de 100 000 kits stockés, compte tenu des très forts séismes des scénarios 5 et 16, une moyenne de 7 574 personnes ne pourra pas être secourue (Tableau 5.24). La colonne 2 donne le nombre global en incluant ces 7 574 victimes et la colonne 3 le nombre net de démunis en soustrayant 7 574. L'optimum serait d'ouvrir 8 entrepôts. La dernière colonne donne la variation (en pourcentage) par rapport à cette valeur optimale.

Nombre des entrepôts	Victimes non secourues		% Par rapport optimal
	Global	Démunis	
1	12 676	5 101	28,166 %
2	11 554	3 980	14,007 %
3	11 065	3 491	12,795 %
4	10 669	3 095	7,316 %
5	10 458	2 884	6,854 %
6	10 273	2 699	1,696 %
7	10 229	2 654	0,000 %
8 -24	10 228	2 654	0,000 %

Table V-31 : Nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Nous retiendrons la quantité de 8 entrepôts comme solution satisfaisante pour le critère de satisfaction de la demande.



Evolution du nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Considérons maintenant les coûts logistiques (création des entrepôts, entreposage et transport). La dernière colonne donne la variation de coûts si on ajoute un entrepôt de plus que dans la solution de la ligne précédente.

Nombre des entrepôts	Coûts logistiques			% variation en ajoutant un entrepôt
	Transport	Entrepôt	Total	
1	579 657	109 233	688 890	0,476 %
2	566 463	119 163	685 626	6,046 %
3	517 441	129 094	646 534	0,679 %
4	503 153	139 024	642 176	0,833 %
5	487 918	148 954	636 872	-1,064 %
6	484 834	158 884	643 719	-1,715 %
7	486 133	168 815	654 948	-1,429 %
8 - 24	485 695	178 745	664 440	0,000 %

Table V-32 : Coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

En ce qui concerne les coûts logistiques, le coût minimum est obtenu pour 5 entrepôts ouverts.

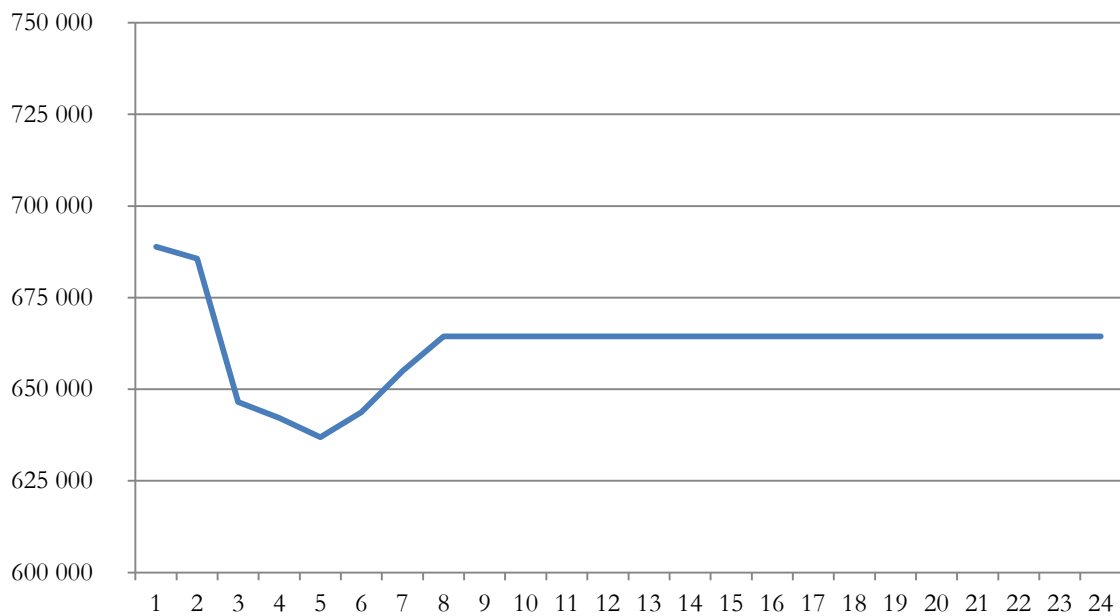


Figure V-11 : Evolution des coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Dans une première approche, la solution à retenir serait donc la solution avec 8 entrepôts donnée plus haut. C'est celle qui semble présenter le meilleur compromis entre efficacité et résilience.

4.2. Variation des capacités globales stockées

Dans cette partie, nous cherchons à mesurer ce qu'amènerait le stockage d'une plus grande quantité de kits. Nous avons retenu ici 200 000 et 300 000. Le premier graphique donne le nombre des victimes non secourues pour une quantité maximale de kits stockés variables y compris celles qu'il est impossible de secourir sans aide extérieure. Sans surprise on constate que le nombre décroît avec le nombre de kits stockés.

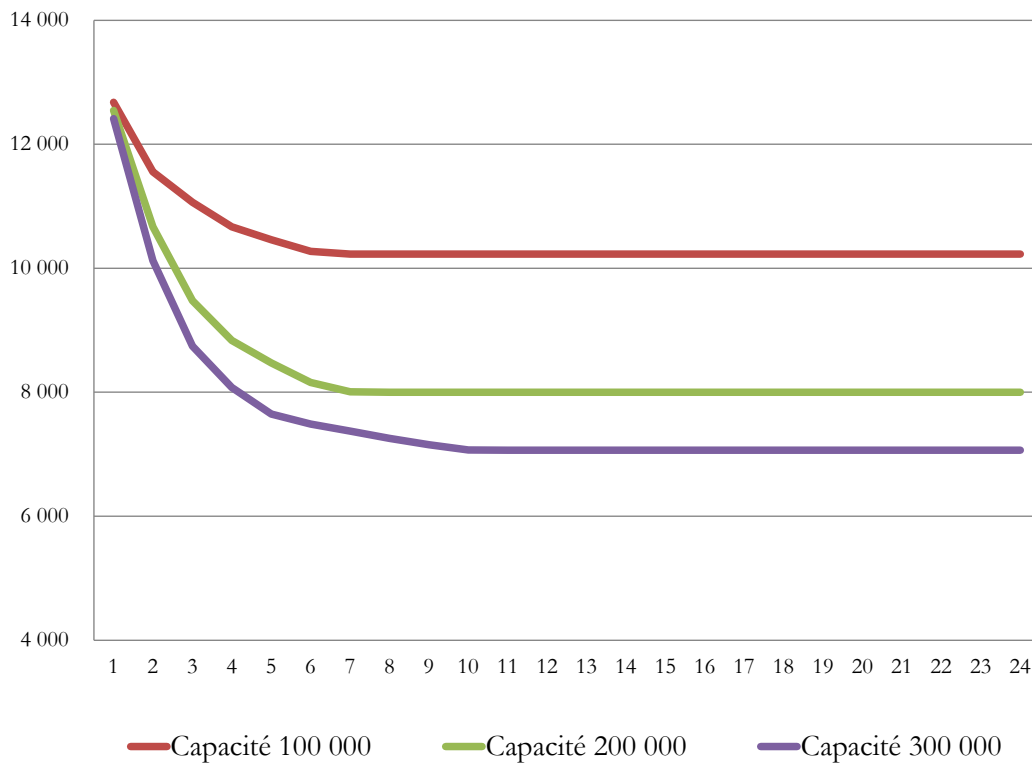


Figure V-12 : Evolution du nombre total de victimes non secourues.

Rappelons que le nombre de victimes impossibles à secourir est en espérance de 7 574, 6 508 et 5 852 pour 100 000, 200 000 et 300 000 kits. Ce second graphique donne les résultats en ce qui concerne les démunis (victimes susceptibles d'être secourues sans aide extérieure mais non secourues). Comme prévu, le nombre de démunis réduit quand on augmente le nombre de kits. Pour les capacités 100 000 et 200 000, le nombre d'entrepôts reste égal à 8. Cependant le nombre des entrepôts augmente significativement de 8 à 11 entrepôts quand on augmente la capacité de 200 000 à 300 000 kits, comme indique la figure suivante sur l'évolution du nombre de victimes non secourues, parmi celles qu'il est possible de secourir pour une quantité maximale de kits stockés variables.

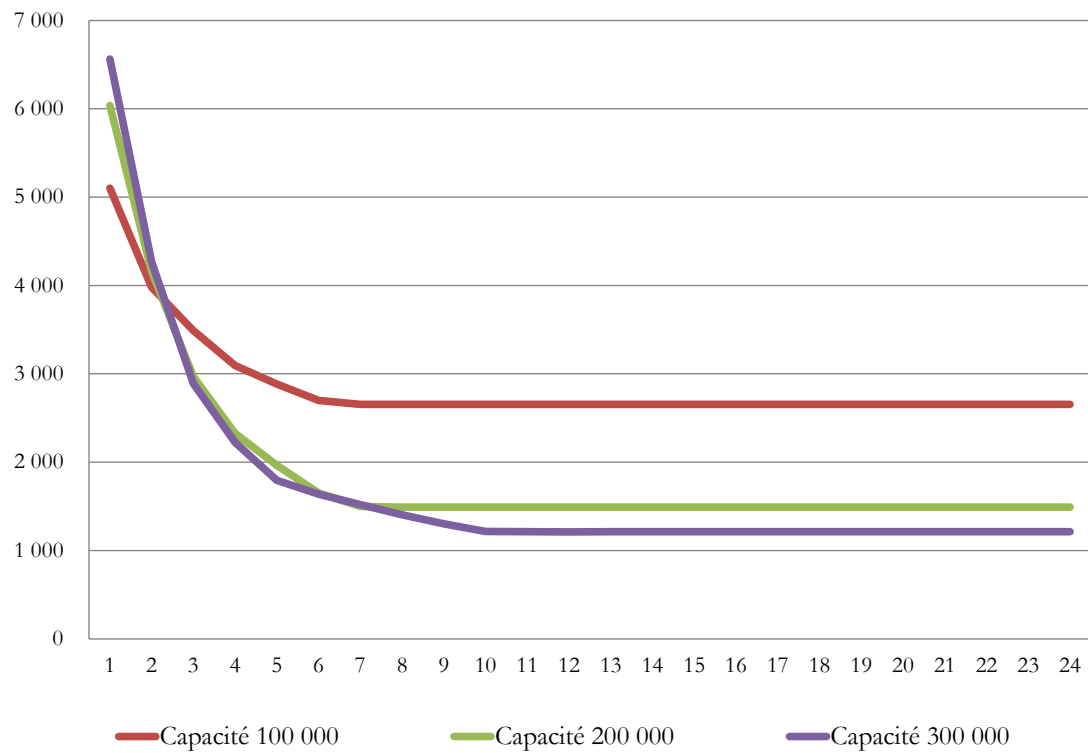


Figure V-13 : Evolution du nombre de victimes non secourues versus capacités global.

En ce qui concerne les coûts logistiques, les courbes sont parfaitement corrélées. L'indice de corrélation est de 97,6 % entre les courbes de capacité de 100 000 et 200 000 kits et de 99 % entre 200 000 et 300 000 kits.

Chapitre VI.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.

Mise au jour à la fin des travaux de thèse d'Aurélié Charles (2010), la problématique traitée dans ce manuscrit s'inscrit dans une réflexion autour de la conception de Chaînes Logistiques Humanitaires (CLH). Dans cette optique, notre mission a consisté à proposer des solutions permettant de garantir l'efficacité et la résilience des réseaux ainsi constitués. Il s'agissait notamment de concrétiser la prise en compte du caractère fortement incertain des opérations humanitaires et de garantir le réalisme et l'applicabilité des outils développés.

Dans ce dernier chapitre, nous revenons, dans un premier temps, sur nos apports quant au problème posé, tant sur les fondements académiques qu'applicatifs. Dans un deuxième temps, nous proposons quelques réflexions sur les perspectives et extensions que nous inspirent les résultats obtenus.

1. Bilan des apports académiques et applicatifs

Les professionnels de l'humanitaire font aujourd'hui face à des enjeux nouveaux dans le cadre de leurs activités. Les bailleurs notamment imposent des garanties de plus en plus drastiques sur la bonne utilisation des fonds mis à disposition en cas de crise. Bien que classique dans le monde industriel, cette exigence est très nouvelle pour ce secteur d'activité, presque contradictoire avec les doctrines et fondamentaux du monde humanitaire. Un autre enjeu réside clairement dans la capacité des organisations humanitaires à raisonner selon plusieurs dimensions de performance. L'approche consistant à « simplement » répondre vite à une situation d'urgence n'est plus satisfaisante. La performance de la réponse humanitaire se juge toujours en fonction de sa vitesse d'exécution mais également de sa capacité à garantir des coûts minimums, à autoriser une flexibilité et/ou une adaptabilité élevées, à limiter son empreinte écologique ou à maximiser sa visibilité (média).

Ces éléments de contexte conduisent bon an, mal an, à se poser la question du développement d'outils d'aide à la décision capables de supporter les acteurs concernés dans l'évaluation et la définition des solutions opérationnelles à mettre en œuvre. Face à ce constat, les chercheurs ont assez largement répondu présents ces quinze dernières années. De nombreuses propositions d'outils et méthodes ont ainsi émergées. Néanmoins, on constate plusieurs limites à ces contributions :

- La plupart des travaux réalisés ne considèrent que de façon très limitée le caractère fortement incertain du monde de la gestion de crise et ne soutiennent que trop peu le développement de solutions dites *résilientes* ;
- Nombreux sont les sujets qui développent des approches analytiques mais n'appuient pas leurs projets sur des données réelles ou à tout le moins *réalistes* ;
- L'essentiel des propositions faites s'intéressent aux facteurs de performance historiques des humanitaires (agilité, réactivité et efficacité) et négligent le nouvel enjeu d'*efficacité* imposé par le contexte économique mondial.

Nous avons tenté dans le cadre de ce travail de recherche d'apporter un début de réponse à ces limites. En particulier, nous nous sommes intéressés au cas de la conception / configuration d'une CLH capable de supporter la réponse à des crises dites *récurrentes* (i.e. cyclones dans les Caraïbes, tremblement de terre le long de la ceinture de feu, inondations en Asie du Sud-Est, etc.). Ces crises, de petites et moyennes envergures, constituent en effet l'essentiel des interventions d'urgence des organisations humanitaires. L'objet principal de notre recherche consistait à proposer des outils d'aide à la décision qui tiennent compte de la réalité du terrain et qui soient capables de garantir des capacités de résilience d'une part, et d'efficacité d'autre part.

Concrètement, nous avons développé quatre contributions complémentaires pour atteindre cet objectif :

- *Contribution n°1* : La première contribution consiste en une méthode instrumentée qui permet d'établir des prévisions de demande (nombre de victimes et nombre d'items nécessaires pour répondre à une crise donnée) qui soient réalistes. En effet, la très grande majorité des outils d'aide à la décision utilisent des prévisions pour pouvoir être utilisés.

Nous avons notamment démontré le lien qui existe entre l'impact d'une catastrophe et les facteurs de résilience et de vulnérabilité de la zone concernée. Notre proposition permet en pratique d'identifier ces facteurs et d'estimer ces impacts. Il y avait là une problématique majeure à laquelle il convenait de répondre ;

- *Contribution n°2* : La seconde contribution s'inscrit dans la lignée de la première (alimentation des outils d'aide à la décision) en structurant une démarche en 5 étapes permettant de constituer des scénarios qui intègrent le caractère incertain des situations de crise. Les deux composantes de l'incertitude – incertitude de résultats et incertitude d'états – sont ainsi embarquées dans la définition des scénarios au travers de la prise en compte de l'aléa existant sur la survenue d'un événement et sur son impact d'une part, et de l'aléa existant sur la disponibilité des ressources et des infrastructures utiles aux opérations de secours d'autre part ;
- *Contribution n°3* : La troisième contribution est un modèle de conception d'une CLH robuste pour un scénario unique. Issu d'un problème de location / allocation classique ce modèle présente l'originalité de tenir compte de la potentielle dégradation des ressources et infrastructures suite à la survenue d'une catastrophe (dimension résilience) et de chercher à optimiser le rapport entre les coûts engagés et le résultat obtenu (dimension efficacité). Présentée sous la forme d'un Programme Linéaire en Nombre Entiers, cette contribution propose par ailleurs une exploitation garantissant davantage de robustesse en autorisant le lissage des éventuelles pénuries ;
- *Contribution n°4* : La quatrième contribution de ce travail de recherche est une extension de la contribution n°3 permettant de considérer un ensemble de scénarios de probabilités. Cette approche multi-scénarios est indispensable à la considération du caractère très incertain des catastrophes humanitaires. En pratique, cette dernière contribution prend la forme d'un Programme Stochastique Multi-Scénarios.

L'ensemble de ces contributions a été confronté à la réalité des faits dans le cadre d'une application au cas des crises récurrentes du Pérou. Ces crises, essentiellement dues aux tremblements de terre (proximité de la ceinture du feu du Pacifique) et aux inondations (phénomène *El Niño*), imposent la constitution d'un réseau logistique de premiers secours qui soit résilient et efficace.

2. Suites à donner et perspectives

Nous envisageons trois catégories d'extension à nos travaux :

- La finalisation, à court terme, de la mise en œuvre de nos propositions au cas des catastrophes récurrentes au Pérou ;
- La conduite, à moyen terme, d'une réflexion sur l'utilisabilité de nos propositions par les acteurs du terrain ;
- Le développement, à plus long terme, de contributions complémentaires permettant de répondre aux limites des propositions faites dans ces travaux.

Concernant l'application au cas du Pérou d'abord, les suites à donner que nous identifions sont les suivantes :

- Les données dont nous disposons pour faire l'étude bien que suffisantes pour valider nos approches n'étaient pas tout à fait exhaustives et exploitables (années manquantes sur les valeurs de certains facteurs de vulnérabilité ou de résilience notamment, quantification des impacts des crises passées souvent agrégée, règles de propagation entre région partiels). En conséquence, une des premières pistes de travail consiste à consolider ces données pour pouvoir affiner l'élaboration des scénarios et alimenter plus précisément encore les modèles de conception de CLH ;
- Si les collaborations que nous avons tissées avec les acteurs de la gestion de crise au Pérou nous ont permis de valider la problématique adressée et de disposer des données utiles à notre étude, nous n'avons pas encore pu véritablement confronter nos résultats aux décideurs du pays. Un travail complémentaire qui s'ouvre consiste clairement à réaliser ce transfert afin de faire bénéficier au pays du résultat de nos réflexions et de permettre – nous l'espérons – une plus grande efficacité des réponses apportées lors des catastrophes et une meilleure utilisation des deniers publics. Un point important consistera à faire prendre conscience aux décideurs de la nécessité d'appréhender le problème de la réponse aux catastrophes selon toutes ses dimensions (vulnérabilité et résilience du pays). Une CLH efficace, efficace, agile et/ou résiliente ne doit pas se limiter à une question de bâtiments ou de camions.

Le dernier point évoqué nous fait rentrer de plain-pied dans la problématique de l'usage de nos propositions. S'il est une chose d'avoir des idées et de démontrer de leur intérêt, il en est une autre de permettre son usage par les gens de terrain. Vis-à-vis de ce sujet, nous envisageons les axes de travail suivant :

- Selon nous, l'enjeu consiste dans un premier temps à consolider l'ensemble des propositions faites dans ce manuscrit avec celles issues des travaux de recherche de (Charles, 2010) dans le cadre d'un outil concret et utilisable par n'importe qui. En d'autres termes, il s'agit de développer un logiciel d'aide à la décision qui soit utilisable sans que l'on ait besoin d'être un spécialiste des techniques statistiques ou d'optimisation. Une plate-forme web pourrait constituer une solution ;
- Dans un deuxième temps, il conviendra de disséminer nos propositions auprès des professionnels de la logistique humanitaire. L'enjeu est ici de démystifier les approches

employées et surtout de convaincre de leur utilité et efficacité. En ce sens, le logiciel évoqué juste avant constituera sans doute un vecteur de choix.

Au-delà des aspects que nous venons d'évoquer, les perspectives les plus nombreuses à ce travail de recherche portent sans nul doute sur le développement de nouvelles contributions scientifiques parmi lesquelles on peut citer :

- Comme pour n'importe quel projet de recherche, la sensibilité des résultats obtenus est un sujet important. Faute de temps et de données, nous n'avons pu véritablement mener à bien cette étude de sensibilité. La mise en œuvre de nos propositions sur plusieurs cas d'application devrait permettre de combler ce manque ;
- Le projet de recherche que nous avons conduit a permis de trouver des solutions pour appréhender certains critères de l'incertitude humanitaire (demande et infrastructures / ressources). Pour autant l'incertitude concerne aussi d'autres critères comme la sécurité, le niveau de médiatisation (et donc le financement), ou la concurrence entre les différents acteurs présents sur le terrain. De cette réflexion naît de nombreux axes de travail potentiels pour garantir une bonne prise en compte de ces nouveaux types aléas dans les décisions à prendre ;
- Nous l'avons dit, ce travail s'est intéressé aux seules catastrophes récurrentes. Si elles sont bien les plus nombreuses, elles ne sont pas forcément les plus critiques en termes de gestion. Les très grosses catastrophes présentent aussi de nombreux problèmes d'aide à la décision, de coordination et de professionnalisation. Des réflexions sont sans doute à conduire pour étendre nos approches à ces crises particulières afin d'améliorer ici aussi résilience et efficacité ;
- Le présent travail de recherche, comme celui de (Charles, 2010) qui le précédait, s'intéressaient aux décisions d'ordre stratégique en phase de préparation (conception et dimensionnement du réseau logistique notamment). Une perspective intéressante consiste à adresser la question de la prise de décision au niveau opérationnel en phase de réponse à une crise. Dans un contexte où l'information est de plus en plus massive (y compris en situation de crise), il s'agira de définir et développer un système d'aide à la décision permettant de supporter, au niveau opérationnel, l'agilité et la coordination des réponses humanitaires en dépit d'un environnement particulièrement perturbé d'une part, et d'acteurs fortement hétérogènes et distribués d'autre part ;
- Le travail conduit a permis de développer des solutions concrètes en matière de localisation et de dimensionnement de CLH. Un complément porte naturellement sur l'optimisation des modes de transport. Ainsi, une perspective forte consiste à développer des outils d'aide à la décision dédiée au problème dit de *routing* qui soient cohérents et compatibles avec les propositions développées dans ce manuscrit (développement des capacités d'efficacité et de résilience et prise en compte de l'incertitude) ;
- Les développements proposés dans ce manuscrit ont été réalisés avec une double vision *gestionnaire* et *producticienne*. Pour autant, ces sujets concernent potentiellement de nombreuses autres disciplines. Ainsi une dernière série de perspectives porte sur le croisement des approches proposées avec d'autres champs disciplinaires tels que la géographie, l'économie ou l'informatique.

- Développer les critères, principes et pratiques pour atteindre une intervention humanitaire efficace et efficiente au niveau stratégique, tactique et opérationnel mettant en exergue les points de réflexion suivant:
 - ❖ Utilisation des outils et expertises des domaines disciplinaires de gestion et de management des organisations pour la logistique humanitaire.
 - ❖ Faut-il privilégier la recherche d'une solution optimale en termes de qualité de service ou d'une solution suffisante respectant les contraintes. Pour Herbert Simon (1955) « un choix est optimal si : (1) il existe un ensemble de critères qui permettent de comparer tous les choix, et (2) si le choix en question est préféré, de par ces critères, à tous les autres. Un choix est satisfaisant si : (1) il existe un ensemble de critères qui décrivent les minima à respecter pour qu'un choix soit satisfaisant, et (2) que le choix en question satisfasse ou dépasse tous ces critères »
 - ❖ Utilisation des fournisseurs locaux versus régionaux. Les premiers contribuent à assurer la reprise de l'activité économique des populations touchées. Les seconds permettent des économies d'échelles pour les achats des secours.
 - ❖ La conciliation du savoir formel et du savoir-faire lors des interventions. Le savoir formel est fondé sur les connaissances et la recherche scientifique soit épistémique, praxéologique, empirique,...sur l'humanitaire. Le savoir-faire est lui fondé sur la pratique et l'expérience des hommes du terrain. Le problème se pose de croiser les deux approches, de faire évoluer le savoir explicite des premiers vers un savoir-faire et à l'inverse de remonter la connaissance du terrain et de la formaliser.

RÉFÉRENCES

- Alexander, D. (2002) *Principles of Emergency Planning and Management*, New York: Oxford University Press.
- Alinovi, L., Mane, E. et al. (2009) *Measuring Household Resilience to Food Insecurity: Application to Palestinian Household*, EC-FAO Food Security Programme, FAO Press.
- Alsahehri, S.A., Rezgui, Y. et al. (2013) Community Resilience Factors to Disaster in Saudi Arabia: the Case of Makkah Province, actes de la conférence The Third International Conference on Disaster Management and Human Health: Reducing Risk, Improving Outcomes, La Corogna: Espagne, p. 359-368, Southampton: WIT Press.
- Altay, N. et Green, L.V. (2005) OR MS Research in Disaster Operations Management, *European Journal of Operational Research*, volume 175, nombre 1, p. 475-493.
- Altay, N. et Green, W.G. III, (2006) OR/MS Research in Disaster Operations Management, *European Journal of Operational Research*, volume 175, nombre 1, p. 475-493.
- Alva, J.E., Meneses, J. et al. (1984) Maximum Seismic Intensity Observed in Peru, actes de la conférence The V Peruvian National Congress of Civil Engineering, accédé le 11 octobre, disponible sur http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis17_a.pdf.
- Anjorin, C.A.A. (2010) Master Project : A Modelling Language for Decision-making Under Uncertainty, Department of Computing, Imperial College London, accédé le 4 mai 2014, disponible sur <http://www.doc.ic.ac.uk/teaching/distinguished-projects/2010/c.anjorin.pdf>
- APNRDH (2010) Report Immediate Key Initiatives for the Future, Action Plan for National Recovery and Development of Haiti (APNRDH), Haiti's Ministry of Planning and External Cooperation, accédé le 10 octobre 2013, disponible sur <http://whc.unesco.org/uploads/activities/documents/activity-651-5.pdf>
- Bagher, M. et Yousefli, A. (2011) An Application of Possibilistic Programming to the Fuzzy Location-Allocation Problems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 53, nombre 9-12, p. 1239-1245.
- Bai, J. et Ng, S. (2006) Confidence Intervals for Diffusion Index Forecasts and Inference with Factor-Augmented Regressions, *Econometrica*, volume 74, nombre 4, p. 1133-1150.
- Bai, J. et Ng, S. (2008) Forecasting Economic Time Series using Targeted Predictors, *Journal of Economics*, volume 146, nombre 1, p. 304-317.
- Baker, P. (2008) Thèse Doctoral, The Role, Design and Operation of Distribution Centres in Agile Supply Chains, School of Management, Cranfield University, accédé le 26 août 2014, disponible sur <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3022/1/Peter%20Baker%20Thesis-2008.pdf>.
- Balcik, B., Beamon, B.M. et al. (2009) Coordination in Humanitarian Relief Chains: Practices, Challenges and Opportunities, *International Journal Production Economics*, volume 126, nombre 1, p. 22-34.
- Banks, E. (2006) *Catastrophic Risk : Analysis and Management*, Sussex: Wiley Finance.

- Bañuls, V.A. et Turoff, M. (2011) Scenario Construction via Delphi And Cross-Impact Analysis, *Technological Forecasting and Social Change*, volume 78, nombre 9, p. 1579-1602.
- Barbarosoglu, G., Ozdamar, L. et al. (2002) An Interactive Approach for Hierarchical Analysis of Helicopter Logistics in Disaster Relief Operations, *European Journal Operation Research*, volume 140, nombre 1, p. 118-133.
- Barrett, L. (2001) Cisco's \$2.25 billion Mea Culpa, CENT News, publié le 9 mai 2001, accédé le 28 août 2014, disponible sur <http://news.cnet.com/2100-1033-257278.html>.
- BBC (2011) article Why is there no looting in Japan after the earthquake?, dans BBC News Magazine, publié le 18 de mars 2011, accédé le 17 mars 2014, disponible sur <http://www.bbc.co.uk/news/magazine-12785802>.
- Beamon, B.M. (2004) Humanitarian Relief Chains: Issues and Challenges, actes de la conférence Proceedings of the 34th International Conference on Computers and Industrial Engineering, San Francisco, USA.
- Beamon, B.M. (1998) Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods, *International Journal of Production Economics*, volume 55, nombre 3, p. 281-294
- Beamon, B.M. et Balcik, B. (2008) Performance Measurement in Humanitarian Relief Chains, *International Journal of Public Sector Management*, volume 21, nombre 1, p. 4-25.
- Beamon, B.M. et Kotleba, S.A. (2006), Inventory Modelling for Complex Emergencies in Humanitarian Relief Operations, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, volume 9, nombre 1.
- Ben-Tal, A. et Nemirovski, A. (1998) Robust Convex Optimization, *Mathematics of Operations Research*, volume 23, nombre 4, p. 769-805.
- Ben-Tal, A. et Nemirovski, A. (1999) Robust Solutions to Uncertain Programs, *Operations Research Letters*, volume 25, nombre 1, p. 1-13.
- Ben-Tal, A. et Nemirovski, A. (2000) Robust Solutions of Linear Programming Problems Contaminated with Uncertain Data, *Mathematical Programming*, volume 88, nombre 1, p. 411-424.
- Ben-Tal, A., Chung, B.D. et al. (2011) Robust Optimization for Emergency Logistics Planning: Risk Mitigation in Humanitarian Relief Supply Chains, *Transportation Research Part B: Methodological*, volume 45, nombre 8, p. 1177-1189.
- Benyoucef, L. (2008) Mémoire HDR, Contributions à la Conception, au Pilotage et à l'Evaluation des Chaînes Logistiques: Approches Hybrides Et Analytiques, Université Paul Verlaine de Metz.
- Bernanke, B.S., et Boivin, J. (2003) Monetary Policy in a Data-rich Environment, *Journal of Monetary Economics*, volume 50, nombre 1, p. 525-546.
- Baud-Lavigne, B. (2012) Thèse de Doctorat, Conception Conjointe des Nomenclatures et de la Chaîne Logistique pour une Famille des Produits : Outils D'optimisation Et Analyse, Université de Grenoble, accédé le 28 août 2014, disponible sur http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/77/01/72/PDF/22689_BAUD-LAVIGNE_2012_archivage.pdf.
- Bertsimas, D. et Thiele, A. (2006) Robust and Data-Driven Optimization: Modern Decision-Making Under Uncertainty, *Tutorials on Operations Research : INFORMS*, Chapter 4, p. 122-195, accédé le 4 mai 2014, disponible sur <http://web.mit.edu/dbertsim/www/papers/Robust%20Optimization/Robust%20and%20Data-Driven%20Optimization.pdf>.

- 0data-driven%20optimization-%20modern%20decision-making%20under%20uncertainty.pdf.
- Bertsimas, D. et Thiele, A. (2006) Robust and Data-Driven Optimization: Modern Decision-Making Under Uncertainty, dans *Tutorials on Operations Research*, INFORMS, Chapter 4, p. 122-195.
- Bhattacharya, U., Rao, J.R. et al. (1992) Fuzzy Multicriteria Facility Location Problem, *Fuzzy Sets and Systems*, volume 51, nombre 1, p. 277-287.
- Bilsel, R.U. et Ravindran, A. (2011) A Multiobjective Chance Constrained Programming Model for Supplier Selection Under Uncertainty, *Transportation Research Part B*, volume 45, nombre 1, p. 1284-1300.
- Birge, J.R. et Rosa, C.H. (1995) Modelling Investment Uncertainty in the Costs of Global CO2 Emission Policy, *European Journal of Operations Research*, volume 83, nombre 3, p. 466-488.
- Birge, J.R. et Louveaux, F. (1997) *Introduction to Stochastic Programming*, New York: Springer Science & Business Media.
- Boivin, J. et Ng, S. (2005) Understanding and Comparing Factor-Based Forecasts, *International Journal of Central Banking*, volume 3, nombre 1, p. 117-151.
- Boivin, J. et Ng, S. (2006) Are More Data Always Better for Factor Analysis?, *Journal of Econometrics*, volume 132, nombre 1, p. 169-194.
- Bouchez, J.-P. (2004) *Les nouveaux travailleurs du savoir*, Paris : Editions d'Organisations.
- Bourbonnais, R. et Usunier J.C. (2001) *Prévisions des Ventes, Théorie et Pratique*, Paris: Economica.
- Bouroche, J.-M. et Saporita, G. (2002) *L'Analyse des Données*, Paris: Editions Presses Universitaires de France.
- Braman, L.M., Van Aalst, M.K., et al. (2013) Climate Forecasts in Disaster Management: Red Cross Flood Operations in West Africa : 2008, *Disasters*, volume 37, nombre 1, p. 144-164.
- Brandimarte, P. et Zotteri, G. (2007) *Introduction to Distribution Logistics*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Brauch, H.G. (2003), Urbanization and Natural Disasters in the Mediterranean: Population Growth and Climate Change, dans the 21st Century, dans *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*, Disaster Risk Management Series, Kreimer, A., Arnold, M. et al. (éditeurs), Washington D.C.: World Bank, accédé le 19 août 2014, disponible sur <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd46/cap11-urbani.pdf>.
- Brimberg, J., Hansen, P. et al. (2000) Improvements and Comparison of Heuristics for Solving the Uncapacitated Multisource Weber Problem, *Operations Research*, volume 48, nombre 1, p. 444-460.
- Brindley, C. (2004) *Supply Chain Risk*, Surrey: Ashgate.
- Bronner, G. (1997) *L'Incertitude*, Paris: Editions Presses Universitaires de France, PUF.
- Bruneau, M., Chang, S.E. et al. (2000) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, volume 19, nombre 4, p. 733-752.
- Campbell, A.M., Vandenbussche, D. et al. (2008) Routing for Relief Efforts, *Transportation Science*, volume 42, nombre 2, p. 127-145.
- Canós, M. J., Ivorra, C. et al. (1999) An Exact Algorithm for the Fuzzy P-Median Problem, *European Journal of Operations Research*, volume 116, nombre 1, p. 80-86.

- Cariño, D.R., Kent, T. et al. (1994) The Russell-Yasuda Kasai Model: An Asset/Liability Model for a Japanese Insurance Company Using Multistage Stochastic Programming, volume 24, nombre 1, p. 29-49.
- Cario, M.C., et Nelson, B.L. (1997) Modeling and Generating Random Vectors with Arbitrary Marginal Distributions and Correlation Matrix, Technical Report, Department of Industrial Engineering and Management Science, Northwestern University.
- Carter, M., Little, P. et al. (2006) Shocks, Sensitivity and Resilience: Tracking the Economic Impacts of Environmental Disaster on Assets in Ethiopia and Honduras, Development and Strategy Governance Division Discussion Paper 32, International Food Policy Research Institute, IFPRI, accédé le 19 août 2014, disponible sur <http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/dsgdp32.pdf>.
- Casey, M. et Sen, S. (2005) The Scenario Generation Algorithm for Multistage Stochastic Linear Programming, *Mathematics of Operations Research*, volume 30, nombre 1, p. 615-631.
- Cassidy, W.B. (2003) A Logistics Lifeline, *Traffic World Magazine*, October 27.
- Castillo J.L. et Alva J.E. (1993) Peligro Sísmico en el Perú, actes de la conférence VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, p. 6-10, Lima: Pérou.
- Caux, C. et al. (2007) Rapport de Synthèse, Logistique en Monde Incertain, GDR MACS.
- CCNUCC (1992) Report La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, 2ème part, addendum, Washington D.C. : UN Press, accédé le 5 avril 2014, disponible sur, <http://unfccc.int/resource/docs/french/a/18p2a01f.pdf>.
- Celade (2004) *América Latina y el Caribe: Estimaciones y Proyecciones de Población 1950-2050*, Boletín demográfico, Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía, CELADE - División de Población, Comisión Económica para América, Latina y el Caribe, volume 37, nombre 73.
- Chakravarty, A.K. (2014) *Supply Chain Transformation: Evolving with Emerging Business Paradigms*, Series Springer Texts in Business and Economics, London: Springer.
- Chandes, J. et Paché, G. (2010) Investigating Humanitarian Logistics Issues: From Operations Management to Strategic Action, *Journal of Manufacturing Technology Management*, volume 21, nombre 3, p. 320-340.
- Chandra, C. et Kumar, S. (2001) Enterprise architectural Framework for Supply-Chain Integration, *Industrial Management & Data Systems*, volume 101, nombre 6, p. 290-303.
- Chandraprakaikul, W. (2010) A Guiding Framework for Designing Humanitarian Relief Supply Chains - A Case Study in Thailand, actes du 21th Annual Conference of the Production and Operations Management Society, POMS, Vancouver, Canada, accédé le 19 août 2014, disponible sur <http://www.pomsmeetings.org/ConfPapers/015/015-0554.pdf>
- Charles, A., Luras, M. et al. (2010) L.N., A Model to Define and Assess the Agility of Supply Chains: Building On Humanitarian Experience, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, volume 40, nombre 8/9, p. 722-741.
- Charles, A. (2010) Thèse de Doctorat, Improving the Design and Management of Agile Supply Chain: Feedback and Application in the Context of Humanitarian Aid, Ecole des Mines d'Albi, Université de Toulouse.
- Chen, M., Mehrotra, S. et al. (2012) Technical Report Scenario Generation for Stochastic Optimization Problems via the Sparse Grid Method, accédé le 11 may 2014, disponible sur

- http://www.iems.northwestern.edu/docs/working_papers/Mehrotra_Chen_Revised_07_08.pdf
- Chopra, S. et Meindl, P. (2010) *Supply Chain Management : Strategy, Planning and Operation*, 4th Edition, New Jersey: Prentice Hall.
- Chopra, S. et Sodhi, M.S. (2004) Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown, *MIT Sloan Management Review*, volume 46, nombre 1, p. 52-61.
- Christopher, M. et Towill, D.R. (2000) Supply Chain Migration from Lean and Functional to Agile and Customized, *Supply Chain Management: An International Journal*, volume 5, nombre 4, p. 206-213.
- Christopher, M. (1992) *Logistics and Supply Chain Management*, London: Pitman Publishing.
- Christopher, M. et Hau L. (2004) Mitigating Supply Chain Risk Through Improved Confidence, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, volume 34, nombre 5, p. 388-396.
- Christopher, M., et Peck, H. (2004) Building the Resilient Supply Chain, *International Journal of Logistics Management*, volume 15, nombre 2, p. 1-13.
- Clower, T. (2007) Economic Applications in Disaster Research, Mitigation, and Planning, dans *Disciplines, Disasters and Emergency Management: The Convergence and Divergence of Concepts, Issues and Trends in the Research Literature*, McEntire, D. (éditeur), Springfield: Charles C. Thomas.
- Cochran, J.J., Cox, L.A. Jr. et al. (2011) *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Oxford: Wiley-Blackwell.
- Cochrane, H. (2004) Economic loss: Myth and Measurement, *Disaster Prevention and Management*, volume 13, nombre 4, p. 290-296.
- Comes, T., Wijngaards, N. et al. (2014) Exploring the future: Runtime Scenario Selection for Complex and Time-Bound Decisions, *Technological Forecasting & Social Change*, article in press, disponible on-line.
- Consigli, G., Dupačová, J. et al. (2000) Generating Scenarios for Multistage Stochastic Programs, *Annals of Operations Research*, volume 100, nombre 1, p. 25-53.
- Contreras, D., Blaschke, T. et al. (2013) Spatial Connectivity as a Recovery Process Indicator: The L'Aquila earthquake, *Technological Forecasting & Social Change*, volume 80, nombre 9, p. 1647-1884.
- Coppola, D.P. (2007) *Introduction to international disaster management*, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J. et al. (2003) Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly*, volume 84, nombre 2, p. 242-261.
- D'Ercole, R. et Metzger, P. (2009) La Vulnérabilité Territoriale : Une Nouvelle Approche des Risques en Milieu Urbain, *Cybergeo : European Journal of Geography*, article 447, mis en ligne le 31 mars 2009, consulté le 01 février 2012. URL : <http://cybergeo.revues.org/22022>.
- D'Ercole, R., Hardy, S. et al. (2012) Les Dimensions Spatiales et Territoriales de la Gestion de Crise à Lima, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, volume 12 nombre 1, mis en ligne le 25 juin 2012, accédé le 26 août 2014, disponible sur <http://vertigo.revues.org/12009>.
- Daskin, M.S. (2008) What You Should Know About Location Modeling, *Naval Research Logistics*, volume 55, nombre 4, p. 283-294.

- Davis, L.B., Samanlioglu, F. et al. (2013) Inventory Planning and Coordination in Disaster Relief Efforts, *International Journal of Production Economics*, volume 141, nombre 1, p. 561–573
- Davis, W.M. (1899) The Geographical Cycle, *Geography Journal*, volume 14, nombre 5, p. 481-504.
- Deleris, L.A. et Erhun, F. (2011) Quantitative Risk Assessment in Supply Chains: A Case Study Based on Engineering Risk Analysis Concepts, dans *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise International Series in Operations Research & Management Science*, Kempf, Karl G., Keskinocak, Pinar et Uzsoy, Reha (éditeurs), volume 152, nombre 1, p. 105-131
- Dempster, M.A.H. et Thompson, R.T. (1999) EVPI-Based Importance Sampling Solution Procedure for Multistage Stochastic Linear Programming on Parallel MIMD Architectures, *Annals of Operations Research*, volume 90, nombre 1, p. 161-184.
- Devlin, E.S. (2006) *Crisis Management Planning and Execution*, Boca Raton: Auerbach Pubn.
- Diebold, F.X. (2007) Support de Cours : Elements of Forecasting, accédé le 19 août 2014, disponible sur <http://www.ssc.upenn.edu/~fdiebold/Teaching221/FullBook.pdf>
- Donohue, C. (1996) PhD thesis, Stochastic Network Programming and the Dynamic Vehicle Allocation Problem, Industrial and Operations Engineering Department, The University of Michigan, Ann Arbor.
- Dupačová, J., Consigli, G. et al. (2000) Scenarios for Multistage Stochastic Programs, *Annals of Operations Research*, volume 100, nombre 1, p. 25-53.
- Dupačová, J., Gröwe-Kuska, N. et al. (2003) Scenario Reduction in Stochastic Programming: An Approach Using Probability Metrics, *Mathematical Programming*, volume 95, nombre 1, p. 493-511.
- Dupont, L. et Lauras, M. (2008) Comment Prévoir la Demande dans les Chaînes Logistiques ?, dans *Serie Solutions Pratiques Logistique et Supply Chain Questions-Réponses*, Paris: WEKA.
- Duran, S., Gutierrez, M.A. et al. (2011) Pre-Positioning of Emergency Items for CARE International, *Interfaces*, volume 41, nombre 1, p. 223-237.
- Dyer, M. et Stougie, L. (2006) Computational Complexity of Stochastic Programming Problems, *Mathematical Programming*, volume 106, nombre 3, p. 423-432.
- EB (2014) Encyclopedia Britannica, accédé le 8 may 2014, disponible sur <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/371701/measurement/233664/Measurement-theory>.
- EM-DAT (2014) www.emdat.be, The International Database, Center for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED.
- Ernst, A. et Krishnamoorthy, M. (1999) Solution Algorithms for the Capacitated Single Allocation Hub Location Problem, *Annals of Operations Research*, volume 86, nombre 1, p. 141-159.
- Escofier, B. et Pagès J. (1997) *Initiation aux traitements statistiques: méthodes, méthodologie*, Paris: Editions Presses Universitaires de France.
- Farahani, R.Z., SteadieSeifi, M. et al. (2010) Multiple Criteria Facility Location Problems: A Survey, *Applied Mathematical Modelling*, volume 34, nombre 7, p. 1689-1709.
- Ferris, E., Petz, D. et al. (2013) The Year of Recurring Disasters: A Review of Natural Disasters in 2012, The Brookings Institution – London School of Economics Project on Internal Displacement Publishing, accédé le 25 july 2014, disponible sur http://www.brookings.edu/~media/research/files/reports/2013/03/natural%20disaster%20review/brookings_review_natural_disasters_2012.pdf.

- Fine, Ch.H. (2001), *Clockspeed: Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage*, New York: Basic Book.
- Fisher, M.L. (1997) What is the Right Supply Chain for your Product?, *Harvard Business Review*, March-April.
- Frazelle, E.H. (2002), *Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management*, New York: McGraw-Hill.
- Frazier, T.G., Thompson C.M. et al. (2013) Development of a Spatially Explicit Vulnerability-Resilience Model for Community Level Hazard Mitigation Enhancement, Proceedings of the Third International Conference on Disaster Management and Human Health: Reducing Risk, Improving Outcomes, p. 13-24.
- Frigg, R. et Hartmann, S. (2012) Models in Science, dans The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (editeur), accédé le 20 août 2014, disponible sur <http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>.
- Galindo, G. et Batta, R. (2013) Review of Recent Developments in OR/MS Research in Disaster Operations Management, *European Journal of Operational Research*, volume 230, nombre 2, p. 201-211.
- Godet, M. (2000) The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls, *Technological Forecasting and Social Change*, volume 65, nombre 1, p. 3-22.
- Goetschalckx, M., Vidal, C.J. et al. (2002) Modeling and Design of Global Logistics Systems: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms, *European Journal of Operational Research*, volume 143, nombre 1, p. 1-18.
- Gong, D., Gen, M. et al. (1997) Hybrid Evolutionary Method for Capacitated Location-Allocation Problem, *Computers and Industrial Engineering*, volume 33, nombre 7-8, p. 577-580.
- Grammaticas, D. (2011) article Japan Earthquake: Explosion at Fukushima Nuclear Plant, BBC News Asia-Pacific, publié 12 mars 2011, accédé le 25 July 2014, disponible sur <http://www.bbc.com/news/world-asia-pacific-12720219>.
- Greenberg, M.R., Lahr, M. et al. (2007) Understanding the Economic Costs and Benefits of Catastrophes and their Aftermath: A Review and Suggestions for the U.S. Federal Government, *Risk Analysis*, volume 27, nombre 1, p. 83-96.
- Grossi, P. et Kunreuther, H. (2005) *Catastrophe modeling : A new approach to managing risk*, New York: Springer-Verlag.
- Groves, D.G. et Lempert, R.J. (2007) A New Analytic Method for Finding Policyrelevant Scenarios, *Global Environmental Change*, volume 17, nombre 1, p. 73-85.
- Habibeh, V.A. et Husaini, b. O. (2011) Overview of Remote Sensing Techniques in Earthquake Prediction, *Journal of Engineering, Design and Technology*, volume 9, nombre 2, p. 164-177.
- Hack, J.T. (1975) Dynamic Equilibrium and Landscape Evolution, dans *Theories of landform development, Collection : Binghamton Symposia in Geomorphology*, Melhorn, W.N. et Flemal, R.C. (éditeur), p. 87-102, New York, HarperCollins Publishers Ltd.
- Hadj-Hamou, K. (2004) Support de Cours : Prévisions de ventes, INP Grenoble.
- Hakimi, S. (1964) Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and some Related Graph Theoretic problems, *Operations Research*, volume 13, nombre 1, p. 462-475.

- Hale, T.S. et Moberg, C.R. (2005) Improving Supply Chain Disaster Preparedness: A Decision Process for Secure Site Location, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, volume 35, nombre 3, p. 195-207.
- Hall, M. (2011) Master thesis, Supply Chain Management in the Development Context: Anatomy of Effective Relief and Development Chains, International Relations Degree, Webster University, Switzerland. Access on 26 April 2014, disponible sur <http://pqdtopen.proquest.com/pqdtopen/doc/1508570767.html?FMT=ABS>.
- Hand, D.J. (1996) Statistics and the Theory of Measurement, *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, volume 159, nombre 3, p. 445-49.
- Handfield, R.B. et McCormack, K. (2008) *Supply chain risk management : minimizing disruptions in global sourcing* (éditeurs), volume 1, Series on resource management, New York: Auerbach Publications.
- Hanks, T.C. et Kanamori, H. (1979) A Moment Magnitude Scale, *Journal of Geophysical Research*, volume 84, nombre B5, p. 2348-2350.
- Hardy, S. (2011) Gestion des Risques, Gestion des Situations d'Urgence à La Paz : base de données et cartographie d'aide à la décision, *Revue du Comité Français de Cartographie*, volume 207, nombre 1, p. 49-62.
- Harrison, A. et Van Hoek, R. (2008) *Logistics Management and Strategy : Competing through the supply chain*, 3rd Edition, Essex: Person Education.
- Heitsch, H. et Römis, W. (2007) Scenario Tree Modeling for Multistage Stochastic Programs, *Mathematical Programming*, volume 118, nombre 2, p. 371-406.
- Heitsch, H. et Römis, W. (2009a) Scenario Tree Modeling for Multistage Stochastic Programs, *Mathematical Programming*, volume 118, nombre 1, p. 371-406.
- Heitsch, H. et Römis, W. (2009b) Scenario Tree Reduction for Multistage Stochastic Programs, *Computational Management Science*, volume 6, nombre 1, p. 117-133.
- Helferich, O.K. et Cook, R.L. (2002) *Securing the Supply Chain*, Illinois: Council of Logistics Management.
- Høyland, K., Kaut M. et al. (2003) A Heuristic for Moment-Matching Scenario Generation, *Computational Optimization and Applications*, volume 24, nombre 1, p. 169-185.
- Huang, C. et Shi, Y. (2002) *Towards Efficient Fuzzy Information Processing*, New York: Springer.
- IDNDR (1997) Early Warning for Technological Hazards Report, International Decade for Natural Disaster Reduction Program, IDNDR, Genève: IDNDR, accédé le 10 mars 2014, disponible sur <http://www.unisdr.org/2006/ppew/whats-ew/pdf/report-on-ew-for-technological-hazards.pdf>.
- IFRC (2007) Red Cross / Red Crescent Climate Guide, International Federation Red Cross Red Crescent, IFRC, accédé le 20 août 2014, disponible sur http://www.climatecentre.org/downloads/File/reports/RCRC_climateguide.pdf.
- IFRC (2012) Annual Report 2012, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, IFRC, accédé le 6 mars 2014, disponible sur http://www.ifrc.org/Global/Photos/Secretariat/201401/1259900-IFRC%20Annual%20Report%202012-EN_LR.pdf.
- INDECI (2004) Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres : Tomo I, Instituto Nacional de Defensa Civil, INDECI, accédé le 5 avril 2014, disponible sur

- http://www.indec.gov.pe/planes_proy_prg/p_estrategicos/plan_nacional_preven_15ene04.pdf
- INDECI (2006) Glosario de Términos, Comisión de Actualización de la Terminología, Instituto Nacional de Defensa Civil, INDECI, accédé le 06 août 2014, disponible sur http://www.indec.gov.pe/publicaciones/pdfs/glosario_final.pdf.
- INDECI (2010) Terminología de Defensa Civil, Instituto Nacional de Defensa Civil, INDECI, accédé le 6 mars 2014, disponible sur http://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/mat_edu/terminologia2010.pdf
- INDECI (2011) Resolución Jefatural 059-2011-INDECI, publié le 14 mar 2011, Instituto Nacional de Defensa Civil, INDECI, accédé le 15 octobre 2013, disponible sur <http://sinpad.indec.gov.pe/UploadPortalSINPAD/RJ%20N%C2%BA%20059-2011-INDECI.pdf>.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Parry, M.L., Canziani, O.F. et al. (éditeurs), Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Cambridge: Cambridge University Press, accédé le 20 août 2014, disponible sur http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf.
- IRIN (2012) Asia's 2012 Figures and Trends, Integrated Regional Information Networks, IRIN, accédé le 25 juillet 2014, disponible sur <http://www.irinnews.org/fr/report/97021/disasters-asia-s-2012-figures-and-trends>
- Jain, V., Benyoucef, L. et al. (2009) Strategic Supplier Selection: Some Emerging Issues and Challenges, *International Journal of Logistics Systems and Management*, volume 6, nombre 1/2, p. 61-88.
- Jarrosso, B. (1994) *Décider ou ne pas Décider ? Réflexions sur les Processus de la Décision*, Paris: Maxima.
- Kall, P. et Wallace, S.W. (1994) *Stochastic programming*, New York: Wiley.
- Kast, R. (2002) *La Théorie de la Décision*, Collection Repères, Paris: La Découverte.
- Kaut, M. et Wallace, S.W. (2003) Evaluation of Scenario-Generation Methods for Stochastic Programming, Stochastic Programming E-Print Series, 14, accédé le 13 may, disponible sur <http://edoc.hu-berlin.de/series/speps/2003-14/PDF/14.pdf>.
- King, A.J. et Wets, J.B. (1991) Epi-convergence of Convex Stochastic Programs, Stochastic and Stochastic Reports, volume 34, nombre 1-2, p. 83-92, accédé le 13 may, disponible sur https://www.math.ucdavis.edu/~rjbw/mypage/Stochastic_Variational_Analysis_files/Kn gW90_lln.pdf
- Kleindorfer, P.R. et Saad, G.H. (2005) Managing Disruption Risks in Supply Chains, *Production and Operations Management*, volume 14, nombre 1, p. 53-68.
- Klibi, W. et Martel, A. (2012a) Modeling Approaches for the Design of Resilient Supply Networks under Disruptions, *International Journal of Production Economics*, volume 135, nombre 2, p. 882-898.
- Klibi, W. et Martel, A. (2012b) Scenario-Based Supply Chain Network Risk Modeling, *European Journal of Operational Research*, volume 223, nombre 1, p. 644-658.
- Klibi, W., Lasalle, F. et al. (2010a) The Stochastic Multi-Period Location-Transportation Problem, *Transportation Science*, volume 44, nombre 2, p. 221-237.
- Klibi, W., Martel, A. et al. (2010b) The Design of Robust Value-Creating Supply Chain Networks: A Critical Review, *European Journal of Operational Research*, volume 203, nombre 1, p. 283-293.

- Knemeyer, A., Zinn, W. et al. (2009) Proactive Planning for Catastrophic Events in Supply Chains, *Journal of Operations Management*, volume 27, nombre 1, p. 141-153.
- Koch, C. (2004) Nike rebounds: How (and Why) Nike Recovered From Its Supply Chain Disaster, Chief Information Officers, CIO, publié le 15 juin 2004, accédé le 8 avril 2014, disponible sur http://www.cio.com/article/32334/Nike_Rebounds_How_and_Why_Nike_Recovered_from_Its_Supply_Chain_Disaster
- Kothari, C.R. (2004) *Research Methodology: Methods and Techniques*, New Delhi: New Age International.
- Kovács, G. (2007) The Humanitarian Supply Chain: Challenge or Role Model?, Centre for Logistics Research Seminar, Hull University Business School, Hull, 4 juillet 2007.
- Kovács, G. et Spens, K.M. (2005) Abductive Reasoning in Logistics Research, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, volume 35, nombre 2, p. 132-144.
- Kovács, G. et Spens, K.M. (2007) Humanitarian Logistics in Disaster Relief Operations, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, volume 37, nombre 2, p. 99-114.
- Kuehn, A.A. et Hamburger M.J. (1963) A Heuristic Program for Locating Warehouses, *Management Science*, volume , PP : 643-666.
- Kuenne, R. E., et Soland, R.M. (1972) Exact and Approximate Solutions to the Multisource Weber Problem, *Mathematical Programming*, volume 3, nombre 1, p. 193-209.
- Kumar, A., Latif, Y.L.A. et al. (2012) Developing Forecasting Tool for Humanitarian Relief Organizations in Emergency Logistics Planning, World Academy of Science, *Engineering and Technology*, volume 6, nombre 11, p. 1640-1646, accédé le 20 août 2014, disponible sur <http://waset.org/publications/10514/developing-forecasting-tool-for-humanitarian-relief-organizations-in-emergency-logistics-planning>.
- Lamothe, J. (2010) Mémoire HDR, Dynamique des Décisions dans les Chaînes Logistiques, INP Toulouse-Mines Albi.
- Lamouri, S. (2006) Mémoire HDR, Synchronisation des Prises de Décision dans les Chaînes Logistiques : Robustesse et Stabilité, Supméca Paris.
- Latour, A. (2001) Trial by Fire: A Blaze In Albuquerque Sets off Major Crisis for Cellphone Giants Nokia Handles Supply Shock with Aplomb as Ericsson of Sweden Gets Burned : Was Sisu the Difference?, The Wall Street Journal, page A1, publié le 29 janvier 2001, accédé le 8 avril 2014, disponible sur http://web.mit.edu/course/15/15.795/WSJ_Nokia%20HandlesSupplyChainShock.pdf
- Lauras, M. (2013) Mémoire HDR, Systèmes d'Aide à la Décision pour des Organisations Collaboratives Efficaces et Agiles: Application à la Gestion de Chaînes Logistiques et à la Gestion de Crises, Edsys-Génie Industriel, Université de Toulouse.
- Lauras, M. (2004) Thèse de Doctorat, Méthodes de Diagnostic et d'Evaluation de Performance pour la Gestion de Chaînes Logistiques, Edsys-Génie Industriel, L'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Laurencelle, L. (2005) *Abrégé sur les Méthodes de Recherche et la Recherche Expérimentale*, PUQ.
- Lee, H.L. (2004), The Triple – A Supply Chain, *Harvard Business Review*, volume 82, nombre 10, p. 102-112.

- Legrain, A. (2011) Mémoire Diplôme de Maîtrise, Génération de Scénarios pour la Demande en Personnels Durant Plusieurs Périodes, Département de Mathématiques et Génie Industriel, école Polytechnique de Montréal.
- Lemos R. (2004) Report: Rise in Virus Attacks Costs Firms Dearly, CNET News, publié le 19 mars 2004, accédé le 8 avril 2014, disponible sur http://news.cnet.com/Report-Rise-in-virus-attacks-costs-firms-dearly/2100-7349_3-5176420.html.
- Lettieri, E., Masella, C. et al. (2009) Disaster Management: Findings from a Systematic Review, *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, volume 18, nombre 2, p. 117-136.
- Li, A.C.Y., Nozick, L. et al. (2012) Shelter Location and Transportation Planning Under Hurricane Conditions, *Transportation Research Part E* 48, p. 715-729.
- Hu, Y., Li, J. et al. (2008) Towards Modeling of Resilience Dynamics, in Manufacturing Enterprises: Literature Review and Problem Formulation, p. 279-284, actes de la conférence The Fifth annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2008, Whashington D.C.: USA.
- Lodree Jr., E.J. et Taskin, S. (2008) An Insurance Risk Management Framework for Disaster Relief and Supply Chain Disruption Inventory Planning, *Journal of Operational Research Society*, volume 59, nombre 1, p. 674-684.
- Lodree Jr., E.J. et Taskin, S. (2009) Supply Chain Planning for Hurricane Response with Wind Speed Information Updates, *Computers and Operations Research*, volume 36, nombre 1, p. 2-15.
- Long, D.C. et Wood, D.F (1995) The Logistics of Famine Relief: Engineering on the Run, *Journal of Business Logistics*, volume 16, nombre 1, p. 213-229.
- Loretan, M., (1997), Generating Market Risk Scenarios Using Principal Component Analysis, dans The measurement of Aggregate Market Risk, paper CGFS, n° 7, Basel: Publications of the Committee on the Global, Financial System (CGFS) -Bank for International Settlements.
- Macalister, T. (2002) Land Rover Settles Parts Squabble, The Guardian, publié le 19 février 2002, accédé le 8 avril 2014, disponible sur <http://www.theguardian.com/business/2002/feb/19/carindustry.motoring>.
- March, J.G. (1981) Footnotes to Organizational Change, *Administrative Science Quarterly*, volume 26, nombre 4, 563.
- Marquès, G. (2010) Thèse de Doctorat, Management des Risques pour l'aide à la Gestion de la Collaboration au Sein d'une Chaîne Logistique : Une Approche Par Simulation, INP Toulouse - Mines Albi.
- Martel, A., Benmoussa, A. et al. (2013) Designing Global Supply Networks for Conflict or Disaster Support: The Case of the Canadian Armed Forces, *Journal of the Operational Research Society*, volume 64, nombre 1, p. 577-596.
- Martha, J. et Vratimos, E. (2002) Creating a Just-in-Case Supply Chain for the Inevitable Next Disaster, *Mercer Management Journal*, volume 14, nombre 1, p. 70-77.
- McCalpin, J.P. (2009) Earthquake Magnitude Scales in Paleoseismology, dans International Geophysics Series, McCalpin, J.P. (éditeur), 2nd Edition, London: Elsevier.
- McEntire, D.A. et Dawson, G. (2007) Intergovernmental Context, dans *Emergency Management: Principles and Practices for Local Government*, Waugh, W.L., Jr. et Tierney K. (éditeurs), 2nd edition, p. 57-70, Whashington D.C.: ICMA Press.

- McEntire, D. et Cope, J. (2004) Damage Assessment After the Paso Robles (San Simeon, CA) Earthquake : Lessons for Emergency Management, Natural Hazards Center at the University of Colorado, accédé le 20 août 2014, disponible sur <http://www.colorado.edu/hazards/research/qr/qr166/qr166.pdf>.
- Mehdizadeh, E., Reza, M. et al. (2011) A New Hybrid Algorithm to Optimize Stochastic-Fuzzy Capacitated Multi-Facility Location-Allocation Problem, *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, volume 7, nombre 1, p. 71-80.
- Mehrotra, S. et Papp, D. (2013) Generating Moment Matching Scenarios using Optimization Techniques, *SLAM Journal on Optimization*, volume 23, nombre 2, p. 963-999, accédé le 2 May 2014, disponible sur <http://users.iems.northwestern.edu/~dpapp/pub/cubature-CG.pdf>
- Meixell, M.J., et Vidyaranya B.G. (2005) Global Supply Chain Design: A literature review and critique, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, volume 41, nombre 6, p. 531-550.
- Mentzer, J.T., Daniel J.F., et al. (2001) Logistics Service Quality as a Segment-Customized Process, *Journal of Marketing*, volume 65, nombre 4, p. 82-104.
- Mete, H.O. et Zabinsky, Z.B. (2010) Stochastic Optimization of Medical Supply Location and Distribution in Disaster Management, *International Journal of Production Economics*, volume 126, nombre 1, p. 76–84.
- Metzger, P., Robert, J. et al. (2013) Dimensions Spatiales et Territoriales de la Gestion de Crise : Les Ressources de Décision et d'Intervention à Lima et Callao, *Revue Géographique de l'Est*, volume 53, nombre 1-2, mis en ligne le 16 septembre 2013, accédé le 22 août 2014, disponible sur <http://rge.revues.org/4576>.
- Mileti, D. (1999) *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Washington D.C.: Joseph Henry Press.
- MINAM (2010) El Perú y el Cambio Climático : Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2010, Ministerio del Ambiente del Perú, Lima: Fondo Editorial del MINAM, accédé le 5 avril 2014, disponible sur, <http://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc2s.pdf>
- Moschandreas D.J. et Karuchit S. (2002) Scenario-Model-Parameter: A New Method of Cumulative Risk Uncertainty Analysis, *Environment International*, volume 28, nombre 4, p. 247-261.
- MVCS (2003) *Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismo-Resistente*, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú (Standard technique pour la conception des bâtiments antisismiques, E.030, Ministère du Logement, de la Construction et de l'Assainissement au Pérou), accédé le 31 août 2014, disponible sur http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo28_a.pdf.
- Mukhopadhyay, A.K. (2005) *Crisis and Disaster Management Turbulence and Aftermath*, New Age International.
- Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. et al. (1995) Robust Optimization of Large-Scale Systems, *Operations Research*, volume 43, nombre 1, p. 264-281.
- Murray, A.T. et Church, R.L. (1996) Applying Simulated Annealing to Planning-Location Models, *Journal of Heuristics*, volume 2, nombre 1, p. 31-53.
- Murray, S. (2005) How to Deliver on the Promises: Supply Chain Logistics, *Financial Times*, publié le 6 janvier 2005, accédé le 20 août 2014, disponible sur

- <http://www.ft.com/cms/s/1/79ae9810-6012-11d9-bd2f-00000e2511c8.html#axzz3AxLrwlXZ>.
- Nakagawa, Y. et Shaw R. (2004) Social Capital: A Missing Link to Disaster Recovery, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, volume 22, nombre 1, p. 5-34.
- Natarajaratnam, M., Capar, I., et al. (2009) Managing Supply Chains in Times of Crisis: A Review of Literature and Insights, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, volume 39, nombre 7, p. 535-573.
- NRC (2006) *Facing Hazards and Disasters: Understanding Human Dimensions*, The National Research Council, NRC, pp. 216-217, Washington D.C.: The National Academies Press, accédé le 8 novembre 2011, disponible sur <http://www.nap.edu/catalog/11671.html>.
- Nury, A.H., Koch, M. et al. (2013) Time Series Analysis and Forecasting of Temperatures in the Sylhet Division of Bangladesh, actes de la conférence The 4th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh, ICEAB, Fukuoka : Japan, August 24-26, accédé le 20 août 2014, disponible sur http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydraulik/koch/paper/2013/ICEAB/Nury_Bangladesh_Paper.pdf.
- Ohlemüller, M. (1997) Tabu Search for Large Location-Allocation Problems, *Journal of the Operational Research Society*, volume 48, nombre 1, p. 745-750.
- O'Leary, M. (2004) *The First 72 Hours: A Community Approach to Disaster preparedness*, Lincoln/Nebraska: iUniverse Publishing.
- Oliver-Smith, A. (1999) What is a Disaster?, dans *The Angry Earth: Disasters in Anthropological Perspective*, Oliver-Smith A. et Hoffman S. (éditeurs), p. 18-34. New York: Routledge.
- Oloruntoba, R. (2010) An Analysis of the Cyclone Larry Emergency Relief Chain: Some Key Success Factors, *International Journal of Production Economics*, volume 126, nombre 1, p. 85-101.
- Oloruntoba, R. et Gray R. (2006) Humanitarian Aid: An Agile Supply Chain?, *Supply Chain Management: An International Journal*, volume 11, nombre 2, p. 115-20.
- Oloruntoba, R. et Gray, R. (2009) Customer Service in Emergency Relief Chains, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, volume 39, nombre 6, p. 486-505.
- Olson, D.L. (2011) *Supply Chain Risk Management: Tools for Analysis*, New York: Business Expert Press.
- Ortuño, M.T., Cristóbal, P. et al. (2013) Decision Aid Models and Systems for Humanitarian Logistics: A survey, dans *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies*, volume 7, Vitoriano, B., Montero, J. et al. (éditeurs), New York: Springer Business + Science Media.
- Ozdamar, L., Ekinçi, E. et al. (2004) Emergency Logistics Planning in Natural Disasters, *Annals of Operations Research*, volume 129, nombre 1/4, p. 217-245.
- Pagès, G., Pham, H. et al. (2004) Optimal Quantization Methods and Applications to Numerical Problems in Finance, dans *Handbook of Computational and Numerical Methods in Finance*, Rachev S.T. (éditeur), p. 253-297, Boston: Birkhäuser .
- PAHO (2005) *La Seguridad Alimentaria y Nutricional en Situaciones de Emergencia: Manejo de los Alimentos en Situaciones de Emergencia*, The Pan American Health Organization, PAHO, Washington D.C.: PAHO, accédé le 22 July 2014, disponible sur http://www.paho.org/spanish/dd/ped/te_nutresp.htm.

- Pang, Y. (2011) Master thesis, Forecasting Using Principal Components from Many Predictors, Department of Mathematics, Stockholm University, accédé le 27 avril 2014, disponible sur <http://www2.math.su.se/matstat/reports/master/2011/rep9/report.pdf>.
- Penck, W. (1973) *Morphological Analysis of Landforms: A Contribution to Physical Geology*, London: Collier-Macmillan Publishers.
- Pennanen, T. (2005) Epi-Convergent Discretizations of Multistage Stochastic Programs, *Mathematics of Operations Research*, volume 30, nombre 1, p. 245-256.
- Pennanen, T. et Koivu, M. (2005) Epi-Convergent Discretizations of Stochastic Programs Via Integration Quadratures, *Numerische Mathematik*, volume 100, nombre 1, p. 141-163.
- Pennanen, T. et Koivu, M. (2002) Integration Quadrature in Discretization of Stochastic Programs, Stochastic Programming E-Print Series, 11, accédé le 21 août 2014, disponible sur <http://edoc.hu-berlin.de/series/speps/2002-11/PDF/11.pdf>.
- Peres, E.Q., Brito Jr, I. et al. (2012) Humanitarian Logistics and Disaster Relief Research: Trends, Applications, and Future Research Directions, actes de la conférence 4th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Quebec: Canada, p. 26-29.
- Pflug, G.Ch. (2001) Scenario Tree Generation for Multiperiod Financial Optimization by Optimal Discretization, *Mathematical Programming*, volume 89, nombre 1, p. 251-271.
- Pflug, G.Ch. et Mirkov, R. (2007) Tree Approximations of Dynamic Stochastic Programs, *SIAM Journal on Optimization*, volume 18, nombre 1, p. 1082-1105.
- Pine, J.C. (2009) *Natural Hazards Analysis: Reducing the Impact of Disasters*, Boca Raton-USA: Auerbach Publications.
- Porter, M.E. (1985) *The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, New York: Free Press.
- PNUD (2009) Elaboración de un Sistema de Información Geográfico y Análisis de Recursos Esenciales para la Respuesta y Recuperación Temprana ante la Ocurrencia de un sismo y/o tsunami en el Área Metropolitana de Lima y Callao, Proyecto SIRAD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD/SDP-052/2009, accédé le 8 novembre 2011, disponible sur <http://www.indeci.gob.pe/proyecto58530/objetos/archivos/20110606103342.pdf>.
- Predes (2009) *Diseño de Escenario sobre el Impacto de un Sismo de Gran Magnitud en Lima Metropolitana y Callao*, Centro de Estudios y Prevención de Desastres, Predes, Lima: Predes Press.
- Prodhon, C. et Prins, C. (2014) A Survey of Recent Research on Location-Routing Problems, *European Journal of Operational Research*, volume 238, nombre 1, p. 1-17.
- Quarantelli, E.L. et Frailing, K. (2007) Looting After a Disaster: A Myth or Reality?, *Natural Hazards Observer*, volume XXXI, nombre 4, p. 1-4, accédé 20 août 2014, disponible sur <http://www.colorado.edu/hazards/o/archives/2007/mar07/mar07.pdf>
- Quarantelli, E.L. (2005) A Social Science Research Agenda for the Disasters of the 21st Century, dans *What is a Disaster? New Answers to Old Questions*, Perry R.W. et Quarantelli E.L. (éditeurs), Philadelphia: Xlibris.
- Rath, S. et Gutjahr, W.J. (2014) A Math-Heuristic for the Warehouse Location-Routing Problem in Disaster Relief, *Computers & Operations Research*, volume 42, nombre February, p. 25-39.
- Rawls, C.G. et Turnquist, M.A. (2010) Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response, *Transportation Research Part B: Methodological*, volume 44, nombre 4, p. 521-534.

- ReVelle, C.S. et Eiselt, H.A. (2005) Location Analysis: A Synthesis and Survey, *European Journal of Operational Research*, volume 165, nombre 1, p. 1-19.
- ReVelle, C.S., Eiselt, H.A. et Daskin, M.S. (2008) A Bibliography for some Fundamental Problem Categories in Discrete Location Science, *European Journal of Operational Research*, volume 184, nombre 1, p. 817-848
- Rice, J. et Caniato, F. (2003) Building a Secure and Resilient Supply Network, *Supply Chain Management Review*, nombre September/October, p. 22-30.
- Rice, J.B. (2005) MG Rover's Supply Chain Disruption, *Supply Chain Strategy*, July.
- Rodman, W.K. (2004) Thesis Master of Science in Logistics Management, Supply Chain Management in Humanitarian Relief Logistics, Department of Operational Sciences, Air Force Institute of Technology, accédé le 14 avril 2014, disponible sur <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422958.pdf>.
- Rongier, C. (2012) Thèse de Doctorat, Gestion de la Réponse à une Crise par la Performance: Vers un Outil d'aide à la Décision, Application à l'Humanitaire, Ecole des Mines d'Albi, Université de Toulouse.
- Rose, A. (2004) Defining and Measuring Economic Resilience to Disasters, *Disaster Prevention and Management*, volume 13, nombre 4, p. 307-314.
- Rose, A. et Liao, S. (2005) Modeling Regional Economic Resilience to Disasters: A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions, *Journal of Regional Science*, volume 45, nombre 1, p. 75-112.
- Rottkemper, B., Fischer, K. et al. (2011) Inventory Relocation for Overlapping Disaster Settings in Humanitarian Operations, *Operations Research Spectrum*, volume 33, nombre 3, p. 721-749.
- Ryfman, P. (1999) *La Question Humanitaire : Histoire, Problématiques, Acteurs et Enjeux de l'Aide Humanitaire Internationale*. Ellipses.
- Saillard, M. (2008) Thèse de Doctorat, Dynamique du soulèvement côtier Pléistocène des Andes centrales : Etude de l'évolution géomorphologique et datations (10Be) de séquences de terrasses marines (Sud Pérou – Nord Chili), Université de Toulouse.
- Salmeron, J. et Apte, A. (2010) Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning, *Production and Operations Management*, volume 19, nombre 5, p. 561-574.
- Saporta, G. (1990) Simultaneous Analysis of Qualitative and Quantitative Data, actes de la conférence The XXXV Riunione Scientifica della Societa Italiana di Statistica, Padova: Italie, p. 63-72.
- Saporta, G. (2006) *Probabilités, analyse des données et statistique*, Editions TECHNIP,
- Sen, A. (1981) Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation, Oxford: Clarendon Press.
- Shapiro, A. (2003) Inference of Statistical Bounds for Multistage Stochastic Programming Problems, *Mathematical Methods of Operations Research*, volume 58, nombre 1, p. 57-68.
- Shapiro, A., Dentcheva, D. et al. (2009) *Lectures on Stochastic programming: Modeling and Theory*, 2nd edition, Philadelphia: SIAM.
- Sharifi, H. et Zhang, Z. (1999), A Methodology for Achieving Agility in Manufacturing Organizations: An Introduction, *International Journal of Production Economics*, volume 62, nombre 1, p. 7-22.
- Sheffi, Y. (2005) *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*, Cambridge-USA: MIT Press Books.

- Sheffi, Y. (2004) Demand Variability and Supply Chain Flexibility, dans *Entwicklungspfade und Meilensteine moderner Logistik: Skizzen einer Roadmap*, Prockl G., Prockl, G. et al. (éditeurs), pp 85-118, Wiesbaden: Gabler.
- Sheu, J. (2007) An Emergency Logistics Distribution Approach for Quick Response to Urgent Relief Demand in Disasters, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, volume 43, nombre 6, p. 687-709.
- Silgado, E. (1978) Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en Perú : 1513- 1974. Lima: Instituto de Geología y Minería (aujourd'hui Ingemin), accédé le 21 août 2014, disponible sur <http://www.jorgealvahurtado.com/files/HistoriaSismosNotablesPeruSilgado.pdf>.
- Simon H.A. (1955) A Behavioral Model of Rational Choice, *Quarterly Journal of Economics*, volume 69, p.99-118.
- Simon, H.A. (1983) Administration et Processus de Décision, dans *Série Politique générale, finance et marketing*, Greffe Xavier (éditeur), Paris: Economica.
- Simpson, N.C. et Hancock, P.G. (2009) Fifty Years of Operational Research and Emergency Response, *Journal of the Operational Research Society*, volume 60, supplement 1, p. 126-139.
- Smith, L.A. (1993) Does a Meeting in Santa Fe Imply Chaos?, dans *Predicting the Future and Understanding the Past*, Weigend, A. et Gershenfeld, N. (éditeurs), SFI Series in Complexity XV, p. 323-344, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Snyder, L.V. (2003) Thèse de Doctorat, Supply Chain Robustness and Reliability: Models and algorithms, Northwestern University.
- Snyder, L.V. (2004) Facility Location Under Uncertainty: A Review, Technical report #04T-015, Department of Industrial & System Engineering, Lehigh University, USA.
- Snyder, L.V. (2006) Facility Location Under Uncertainty: A Review, *IIE -Transactions*, volume 38, nombre 7, p. 537-554.
- Socarrás, M. et Bolet, M. (2010) Alimentación y Nutrición de la Población ante Situaciones de Desastres Naturales, *Revista Cubana de Salud Pública*, volume 36, nombre 4, p. 361-366.
- Stephenson, M. (2005) Making Humanitarian Relief Networks More Effective: Operational Coordination, Trust and Sense Making, *Disasters*, volume 29, nombre 4, p. 337-350.
- Stewart, J. (2003) Moving Food, *African Security Review*, volume 12, nombre 1, p. 17-27.
- Tang, C.S. (2006) Perspectives in Supply Chain Risk Management, *International Journal of Production Economics*, volume 103, nombre 1, p. 451-488.
- Tanonkou, G.A. (2007) Thèse de Doctorat, Une Approche par Relaxation Lagrangienne pour l'optimisation d'un Réseau de Distribution : Modèles Stochastiques Et Fiables, Université Paul Verlaine-Metz, accédé le 28 août 2014, disponible sur http://docnum.univ-lorraine.fr/public/UPV-M/Theses/2007/Tanonkou.Guy_Aime.SMZ0708.pdf.
- Taskin, S. et Lodree, E.J. (2010) Inventory Decisions for Emergency Supplies Based on Hurricane Count Predictions, *International Journal of Production Economics*, volume 126, nombre 1, p. 66-75.
- Tatham, P.H., Oloruntoba, R. et al. (2012) Cyclone Preparedness and Response: An Analysis of Lessons Identified Using an Adapted Military Planning Framework, *Disasters*, volume 36, nombre 1, p. 54-82.
- Tavera, H. et Bufo, E. (2001) Source Mechanism of Earthquakes in Peru, *Journal of Seismology*, volume 5, p. 519-539.

- Thomas, A. (2011) *Surviving Alone: Improving Assistance to Colombia's Flood Victims*, Refugees International, Washington: Refugees International, <http://refugeesinternational.org/policy/in-depth-report/surviving-alone-improving-assistance-colombias-flood-victims>.
- Tomasini, R.M. et Van Wassenhove L.N. (2004) *A Framework to Unravel, Prioritize and Coordinate Vulnerability and Complexity Factors Affecting an Humanitarian Response Operation*, working paper series, INSEAD.
- Tomasini, R. et Van Wassenhove, L.N. (2009) *Humanitarian Logistics*, Basingstoke: Palgrave MacMillan.
- TPS (2011) *The Sphere Project: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*, Schumacher Centre for Technology and Development, Hampshire: Hobbs the Printers, accédé le 21 août 2014, disponible sur <http://www.sphereproject.org/resources/?search=1&keywords=&language=English&category=22&subcat-22=23&subcat-29=0&subcat-31=0&subcat-35=0&subcat-49=0>.
- Treece, J.B. (1997) *Fire Will Slow Toyota Exports to U.S.*, Automotive News, publié le 10 février 1997, accédé le 8 avril 2014, disponible sur <http://www.autonews.com/article/19970210/ANA/702100812/fire-will-slow-toyota-exports-to-u.s>.
- Truptil, S. (2011) *Thèse de Doctorat, Etude de L'approche de L'interopérabilité par Médiation dans le Cadre d'une Dynamique de Collaboration Appliquée à la Gestion de Crise*, de l'INP Toulouse – Mines Albi.
- UNDP (2004) *A Global Report, Reducing Disaster Risk, a Challenge for Development*, The United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, p. 146, New York: John S. Swift Co, accédé le 21 août 2014, disponible sur http://www.undp.org/content/dam/undp/library/crisis%20prevention/disaster/asia_pacific/Reducing%20Disaster%20risk%20a%20Challenge%20for%20development.pdf.
- USGS (2002) *USGS Earthquake Magnitude Policy*, The United States Geological Survey, USGS, accédé 14 octobre 2013, disponible sur http://earthquake.usgs.gov/aboutus/docs/020204mag_policy.php.
- USGS (2011) *Historical World Earthquakes Sorted by Date*, The United States Geological Survey, USGS, accédé le 8 novembre 2011, disponible temporairement sur <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php/> (après <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.)
- USGS (2014) *Notable Earthquakes/ Historic Earthquakes in Peru*, United State Geological Survey, USGS, accédé le 23rd November 2014, disponible temporairement sur <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php/> (après <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.)
- Vale, C.D. et Maurelli, V.A. (1983) *Simulating Multivariate Nonnormal Distributions*, *Psychometrika*, volume 48, nombre 1, p. 465-471.
- Van Hoek, Remko I. et al. (2001) *Measuring Agile Capabilities in the Supply Chain*, *International Journal of Operations & Production Management*, volume 21, nombre 1/2, p. 126-148.
- Van Notten, P.W.F., Rotmans, J. et al. (2003) *An Updated Scenario Typology*, *Futures*, volume 35, nombre 5, p. 423-443.
- Van Wassenhove, L.N. (2006) *Blackett Memorial Lecture: Humanitarian Aid Logistics: Supply Chain Management in High Gear*, *Journal of the Operational Research Society*, 57, p. 475-489,

- accédé le 21 août 2014, disponible sur
[http://ingenieria.udea.edu.co/~pmaya/ClubLectura/papers/\(2006\)%20Humanitarian%20Aid%20Logistics%20Supply%20Chain%20Management%20in%20High%20Gear.pdf](http://ingenieria.udea.edu.co/~pmaya/ClubLectura/papers/(2006)%20Humanitarian%20Aid%20Logistics%20Supply%20Chain%20Management%20in%20High%20Gear.pdf).
- Wagner, S.M. et Bode, C. (2006) An Empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability, *Journal of Purchasing & Supply Management*, volume 12, nombre 6, p. 301-312.
- Wagner, S.M. et Neshat, N. (2010) Assessing the Vulnerability of Supply Chains Using Graph Theory, *International Journal of Production Economics*, volume 126, nombre 1, p. 121-129.
- WB (2000) *Entering the 21st Century: World Development Report 1999/2000*, World Bank, WB, Washington, D.C. : WB Press.
- WB (2010) Natural Hazards, UnNatural Disasters : The Economics of Effective Prevention, The World Bank, WB, accédé le 20 août 2014, disponible sur
http://www.gfdrr.org/sites/gfdrr.org/files/nhud/files/NHUD-Report_Full.pdf.
- Weber, A. (1929) *Über den Standort der Industrien*, (Alfred Weber's Theory of the Location of Industries), Chicago: The University of Chicago Press.
- Wisner, B., Blaikie, P. et al. (2004) *At Risk Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, New York: Routledge.
- Xu, H., Zhang, K. et al. (2010) Storm Surge Simulation Along The U.S. East and Gulf Coasts Using a Multi-Scale Numerical Model Approach, *Ocean Dynamics*, volume 60, p. 1597-1619.
- Yi, W. et Ozdamar, L. (2007) A Dynamic Logistics Coordination Model for Evacuation and Support in Disaster Response Activities, *European Journal of Operational Research*, volume 179, nombre 3, p. 1177-1193.
- Zhang, K., Li, Y. et al. (2013) Comparison of Three Methods for Estimating the Sea Level Rise Effect on Storm Surge Flooding, *Climatic Change*, volume 118, nombre 2, p. 487-500.
- Zhou, J. et Liu, B. (2003) News Stochastic Models for Capacitated Location- Allocation Problem, *Computers & Industrial Engineering*, volume 45, nombre 1, p. 111-126.
- Zhou, J. et Liu, B. (2007) Modeling Capacitated Location-Allocation Problem with Fuzzy Demands, *Computers & Industrial Engineering*, volume 53, nombre 1, P. 454-468.
- Zimmerman, R., Restrepo, C.E. et al. (2005) Electricity Case: Main Report: Risk, Consequences, and Economic Accounting Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events, Institute for Civil Infrastructure Systems, New York University-Wagner Graduate School, accédé le 21 août 2014, disponible sur
<http://www.icisnyu.org/assets/documents/NYUYr1ElecCase3Stats072905Final.pdf>.
- Zsidisin, G.A. et Bob, R. (2008) Supply Chain Risk, *International Series In Operations Research & Management Science*, volume 124, New York: Springer.

PUBLICATIONS

Chapitres de livres:

1. Lauras M., Vargas J., Dupont L. et Charles A. (2014) A Location-Allocation Model for More Consistent Humanitarian Supply Chains, dans Hanachi Ch., Bénaben F. et Charoy F. (Eds.), *Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries First International Conference, ISCRAM-med 2014 Toulouse, France, October 15-17, 2014 Proceedings, Lecture Notes in Business Information Processing*, volume 196, Springer International Publishing: Switzerland. Récupéré de: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-11818-5>.
2. Vargas J., Lauras M., Dupont L. et Charles A. (2013) Towards a Demand Forecast Methodology for Recurrent Disaster, dans Brebbia C.A. (Ed.), *Disaster Management and Human Health; Reducing Risk, Improving Outcomes*, WIT Transactions on the Built Environment, volume 133, Wessex Institute of Technology Press Publishing: Royaume Unis. Récupéré de: <http://www.witpress.com/books/978-1-84564-738-4>.

Actes du congrès:

3. Lauras M., Vargas J., Dupont L. et Charles A. (2014) article, A Location-Allocation Model for More Consistent Humanitarian Supply Chains, The First International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries, ISCRAM-med 2014, Toulouse: France. Récupéré de: <http://irit.fr/ISCRAMMED2014/>.
4. Vargas J., Charles A., Lauras M. et Dupont L. (2014) article, Designing Realistic Scenarios for Disaster Management Quantitative Models, The 11th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, Pennsylvania: Les États-Unis. Récupéré de: <http://iscram2014.ist.psu.edu/sites/default/files/misc/proceedings/p65.pdf>.
5. Vargas J., Lauras M., Dupont L. y Charles A (2014) poster, Towards a More Consistent Humanitarian Supply Chain Design, The 11th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, Pennsylvania; Les États-Unis.
6. Vargas J., Lauras M., Dupont L. et Charles A. (2013) article, Towards a Demand Forecast Methodology for Recurrent Disaster, The 3rd International Conference on Disaster Management and Human Health; Reducing Risk, Improving Outcomes, La Corogna; l'Espagne. Récupéré de: <http://www.wessex.ac.uk/13-conferences/disaster-management-2013.html>.
7. Vargas J., Charles A., Lauras M. et Dupont L. (2012) article, Towards a method for qualitative and quantitative assessment of humanitarian disaster demand forecast”, The 4th Production and Operations Management World Conference, POMS, Amsterdam; la Hollande. Récupéré de: <http://euroma2012.euroma-online.org/cms/view/51.html>.

Communications:

8. Vargas J., Laurus M., Dupont L. et Charles A. (2014) Toward a Design Efficient, Agile and Robust for Humanitarian Supply Chain: the Case of Earthquake in Peru. Poster 2nd PHD research, en Séminaire Doctoral du Laboratoire de Décision et Information pour les Systèmes de Production, DISP, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, INSA-Lyon.
9. Vargas J., Laurus M., Dupont L. et Charles A. (2013) Approche pour la conception d'une chaîne logistique efficace, agile et robuste. En 14ème Congrès Ecole Doctoral Systèmes, EDSYS, Tarbes.
10. Vargas J., Laurus M., Dupont L. et Charles A. (2013) Toward a Design Efficient, Agile and Robust for Humanitarian Supply Chain: the Case of Earthquake in Peru. Poster 1st year PHD research, en Séminaire Doctoral du Laboratoire de Décision et Information pour les Systèmes de Production, DISP, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, INSA-Lyon.

RESUME

Aide à la conception de chaînes logistiques humanitaires efficaces et résilientes : application au cas des crises récurrentes péruviennes

Chaque année, plus de 400 catastrophes naturelles frappent le monde. Pour aider les populations touchées, les organisations humanitaires stockent par avance de l'aide d'urgence dans des entrepôts. Cette thèse propose des outils d'aide à la décision pour les aider à localiser et dimensionner ces entrepôts. Notre approche repose sur la construction de scénarios représentatifs. Un scénario représente la survenue d'une catastrophe dont on connaît l'épicentre, la gravité et la probabilité d'occurrence. Cette étape repose sur l'exploitation et l'analyse de bases de données des catastrophes passées. La seconde étape porte sur la propagation géographique de la catastrophe et détermine son impact sur la population des territoires touchés. Cet impact est fonction de la vulnérabilité et de la résilience du territoire. La vulnérabilité mesure la valeur attendue des dégâts alors que la résilience estime la capacité à résister au choc et à se rétablir rapidement. Les deux sont largement déterminées par des facteurs économiques et sociaux, soit structurels (géographie, PIB...) ou politiques (existence d'infrastructure d'aide, normes de construction...). Nous proposons par le biais d'analyses en composantes principales (ACP) d'identifier les facteurs influents de résilience et de vulnérabilité, puis d'estimer le nombre de victimes touchées à partir de ces facteurs. Souvent, les infrastructures (eau, télécommunication, électricité, voies de communication) sont détruites ou endommagées par la catastrophe (ex : Haïti en 2010). La dernière étape a pour objectif d'évaluer les impacts logistiques en ce qui concerne : les restrictions des capacités de transport existant et la destruction de tout ou partie des stocks d'urgence. La suite de l'étude porte sur la localisation et le dimensionnement du réseau d'entrepôt. Nos modèles présentent l'originalité de tenir compte de la dégradation des ressources et infrastructures suite due à la catastrophe (dimension résilience) et de chercher à optimiser le rapport entre les coûts engagés et le résultat obtenu (dimension efficacité). Nous considérons d'abord un scénario unique. Le problème est une extension d'un problème de location classique. Puis, nous considérons un ensemble de scénarios probabilisés. Cette approche est indispensable à la considération du caractère très incertain des catastrophes humanitaires. L'ensemble de ces contributions a été confronté à la réalité des faits dans le cadre d'une application au cas des crises récurrentes du Pérou. Ces crises, essentiellement dues aux tremblements de terre et aux inondations (*El Niño*), imposent la constitution d'un réseau logistique de premiers secours qui soit résilient et efficace.

Mots clés: Chaînes logistiques humanitaire, analyses en composantes principales, scénarios, programmation stochastique, crises et catastrophes récurrentes, vulnérabilité et résilience.

Resilient and efficient humanitarian supply chain design approach: application to recurrent Peruvian disasters

Every year, more than 400 natural disasters hit the world. To assist those affected populations, humanitarian organizations store in advance emergency aid in warehouses. This PhD thesis provides tools for support decisions on localization and sizing of humanitarian warehouses. Our approach is based on the design of representative and realistic scenarios. A scenario expresses some disasters' occurrences for which epicenters are known, as well as their gravity and frequency. This step is based on the exploitation and analysis of databases of past disasters. The second step tackles about possible disaster's propagation. The objective consists in determining their impact on population on each affected area. This impact depends on vulnerability and resilience of the territory. Vulnerability measures expected damage values meanwhile resilience estimates the ability to withstand some shock and recover quickly. Both are largely determined by social and economic factors, being structural (geography, GDP, etc.) or political (establishment or not relief infrastructure, presence and strict enforcement of construction standards, etc.). We propose through Principal Component Analysis (PCA) to identify, for each territory, influential factors of resilience and vulnerability and then estimate the number of victims concerned using these factors. Often, infrastructure (water, telecommunications, electricity, communication channels) are destroyed or damaged by the disaster (e.g. Haiti in 2010). The last step aims to assess the disaster logistics impact, specifically those related to with: transportation flows capacity limitations and destruction of all or part of emergency relief inventories. The following of our study focuses on location and allocation of a warehouses' network. The proposed models have the originality to consider potential resources and infrastructure degradation after a disaster (resilience dimension) and seek optimizing the equilibrium between costs and results (effectiveness dimension). Initially we consider a single scenario. The problem is an extension of classical location studies. Then we consider a set of probable scenarios. This approach is essential due to the highly uncertain character of humanitarian disasters. All of these contributions have been tested and validated through a real application case: Peruvian recurrent disasters. These crises, mainly due to earthquakes and floods (*El Niño*), require establishment of a first aid logistics network that should be resilient and efficient.

Keywords: humanitarian logistics chains, principal component analysis, scenarios, stochastic programming, recurrent disasters and crises, vulnerability and resilience.